



Australian Government

MENCEGAH DRAINASE ASAM DAN LOGAM



MENCEGAH DRAINASE ASAM DAN LOGAM

Praktik Kerja Unggulan dalam Program Pembangunan Berkesinambungan untuk Industri Pertambangan

Agustus 2016





MENCEGAH DRAINASE ASAM DAN LOGAM

*Praktik Kerja Unggulan dalam Program
Pembangunan Berkesinambungan untuk
Industri Pertambangan*

Agustus 2016

Peringatan (Disclaimer)

Praktik Kerja Unggulan dalam Program Pembangunan Berkesinambungan untuk Industri Pertambangan.

Publikasi ini telah dikembangkan oleh kelompok kerja yang terdiri dari para ahli, perwakilan industri, pemerintah serta non-pemerintah. Upaya dari semua anggota kelompok kerja sangat dihargai.

Pandangan dan pendapat yang diutarakan dalam publikasi ini tidak mencerminkan pandangan dari Pemerintah Australia atau Menteri Luar Negeri, (Minister for Foreign Affairs) Menteri Perdagangan dan Penanaman Modal (Minister for Trade and Investment) dan Menteri Sumber Daya dan Australia Utara (Minister for Resources and Northern Australia).

Meskipun berbagai upaya yang pantas telah dilakukan untuk memastikan isi publikasi ini berdasarkan pada fakta-fakta yang benar, Persemakmuran tidak menerima pertanggungjawaban dalam hal keakuratan atau kelengkapan materi, dan tidak bertanggung jawab atas kerugian atau kerusakan apa pun yang mungkin timbul secara langsung atau tidak langsung melalui penggunaan, atau mengandalkan pada isi publikasi ini.

Para pengguna buku pegangan ini harus ingat bahwa buku ini dimaksudkan sebagai rujukan umum dan tidak dimaksudkan untuk menggantikan kebutuhan nasihat profesional yang relevan dengan situasi khusus dari masing-masing pengguna. Rujukan pada perusahaan atau produk dalam buku pegangan ini tidak boleh dianggap sebagai dukungan Pemerintah Australia bagi perusahaan-perusahaan tersebut atau produk-produknya.

Dukungan bagi Praktik Kerja Unggulan dalam Program Pembangunan Berkesinambungan untuk Industri Pertambangan (LPSPD) diberikan oleh program bantuan Australia yang dikelola oleh Departemen Luar Negeri dan Perdagangan (Department of Foreign Affairs and Trade), karena nilai laporan dalam memberikan studi bimbingan dan kasus praktis untuk digunakan dan diterapkan di negara-negara berkembang.

Sampul Kiri: Endapan penguapan rembesan DAL (acid and Metalliferous drainage) di hilir penimbunan batuan sisa tambang yang tertutup

Sampul Tengah: Sebagian pit masam yang dibanjiri, memperlihatkan pengoksidasian batuan sulfida

Sampul Kanan: Pabrik pengolahan air dengan dosis kapur

Foto-foto di sampul: D Jones

© Commonwealth of Australia 2016

Karya ini berhak cipta. Selain dari menggunakan sebagaimana yang diizinkan berdasarkan *Undang-Undang Hak Cipta 1968*, tidak ada bagian yang dapat digandakan dengan proses apa pun tanpa izin tertulis sebelumnya dari Persemakmuran. Permintaan dan pertanyaan terkait penggandaan dan hak-hak harus ditujukan ke Commonwealth Copyright Administration, Attorney-General's Department, Robert Garran Offices, National Circuit, Canberra ACT 2600 atau diposting di www.ag.gov.au/cca.

Agustus 2016.

Daftar Isi

SAMBUTAN	vi
PRAKATA	viii
1.0 PENDAHULUAN	1
1.1 Ruang lingkup buku ini dan siapa yang harus menggunakannya	1
1.2 Ikhtisar permasalahan	2
1.3 Pembangunan berkelanjutan	4
2.0 MEMAHAMI DRAINASE ASAM DAN LOGAM	7
2.1 Jenis-jenis DAL	7
2.2 Indikator-indikator DAL	8
2.3 Produksi DAL	12
2.4 Pembakaran spontan (self-heating) dan penyalaan-otomatis (auto-ignition)	15
2.5 Asam dan kemasaman	15
2.6 Muatan kemasaman	16
2.7 Sumber-sumber DAL	17
2.8 Faktor-faktor yang mempengaruhi laju pembentukan DAL	21
3.0 KHTISAR PRAKTIK KERJA UNGGULAN UNTUK PENCEGAHAN DAL	22
3.1 Pra-tambang	23
3.2 Operasi	23
3.3 Penutupan	30
4.0 MENCIRIKAN BAHAN TAMBANG DAN MEMPREDIKSI DAL	38
4.1 Ikhtisar	38
4.2 Sampling untuk karakterisasi	43
4.3 Uji geokimia statis	47
4.4 Pemodelan blok DAL dan penjadwalan bahan	57
4.5 Uji geokimia kinetik	64
4.6 Penskalaan hasil uji laboratorium	73
4.7 Mengestimasi dan pemodelan laju pembentuk dan pelepas polutan	75
5.0 MENILAI RISIKO YANG TERPAPAR OLEH DAL	78
5.1 Risiko dan kewajiban—pelajaran dari tinjauan perusahaan	79
5.2 Risiko DAL di lokasi-lokasi brownfield	84
5.3 Mengidentifikasi dan melindungi nilai-nilai utama lingkungan	90
5.4 Kerangka kerja untuk menilai risiko DAL pada lingkungan	93
6.0 MENGELOLA BAHAN SULFIDA UNTUK MENCEGAH DAL	97
6.1 Pengelolaan timbunan batuan sisa untuk meminimalkan DAL	98
6.2 Pengelolaan tailing untuk meminimalkan DAL	120
6.3 Sistem lapisan tanah penutup untuk batuan sisa dan tailing	131
6.4 Pencampuran dan pembuangan limbah gabungan	135
6.5 Tambang-tambang di bawah tanah	136
6.6 Danau-danau pit	136
6.7 Lokasi pertambangan brownfield	144
6.8 Lokasi-lokasi tambang yang terbengkalai/warisan	145

7.0	PENGOLAHAN DAL	152
7.1	Mengapa dan kapankah harus mengolahnya?	152
7.2	Pertimbangan-pertimbangan umum beberapa sistem pengolahan	153
7.3	Teknologi pengolahan—aktif atau pasif?	154
8.0	KERANGKA KERJA REGULASI UNTUK MENILAI DAN MENGELOLA DAL	169
8.1	Pendahuluan	169
8.2	Peran Pemerintah Negara Bagian dan Pemerintah Teritori	170
8.3	Peran Pemerintah Australia	171
8.4	Dampak kumulatif DAL	172
8.5	Pertimbangan non-hukum bagi operator pertambangan	172
8.6	Lokasi-lokasi tambang yang terbengkalai atau warisan	173
8.7	Operasi pertambangan internasional	174
9.0	EVALUASI DAN PEMANTAUAN KINERJA	176
9.1	Pendahuluan	176
9.2	Evaluasi kinerja	176
9.3	Model konseptual lokasi proses-proses DAL	177
9.4	Pemantauan	178
9.5	Penyimpanan data, evaluasi dan pelaporan	180
10.0	MENGGOMUNIKASIKAN PERMASALAHAN DAL KEPADA PARA PEMANGKU KEPENTINGAN DAN INVESTOR	182
10.1	Ikhtisar	182
10.2	Kerangka kerja pelaporan	183
10.3	Penutupan tambang dan rehabilitasi	184
11.0	KETERANGAN PENUTUP DAN PELUANG MASA DEPAN	184
11.1	Gambaran besar	186
11.2	Teknologi pencegahan dan mitigasi	186
11.3	Pemantauan, pelaporan dan izin sosial untuk beroperasi	188
	LAMPIRAN 1	189
	GLOSARIUM	195
	REFERENSI	201

STUDI KASUS:

Studi Kasus 1: Perencanaan LoM untuk penutupan dan pemantauan pasca-penutupan, tambang emas Kelian, Indonesia	31
Studi Kasus 2: Penggunaan data karakterisasi untuk mengarahkan pengelolaan PAF yang tepat dari limbah tambang batubara, tambang batubara Stockton, Selandia Baru	59
Studi Kasus 3: Penggunaan data uji statis dan kinetik dalam strategi pengelolaan limbah untuk bahan PAF, Newcrest Cadia Valley Operations, New South Wales	68
Studi Kasus 4: Pengelolaan limbah shale (endapan batuan liat) PAF berdasarkan kerangka kerja penilaian risiko Dal Rio Tinto Iron Ore, wilayah Pilbara, Western Australia	82
Studi Kasus 5: Kemitraan publik-swasta untuk memfasilitasi operasi ekonomi yang sedang berlangsung dan untuk meningkatkan prospek penutupan untuk lokasi Brownfield, Savage River Mine, Tasmania	85
Studi Kasus 6: Pemantauan jangka panjang menunjukkan keberhasilan pembangunan di atas tanah untuk menampung batuan sisa, Martha Mine, Selandia Baru	107
Studi Kasus 7: Pembangunan WRD dengan pemadatan progresif antara lift-lift, tambang PanAust, Laos	112
Studi Kasus 8: Pembersihan tailing dari sulfida untuk meningkatkan prospek penutupan, tambang Ok Tedi, Papua Nugini	125
Studi Kasus 9: Danau pit yang dibanjiri dengan rezim aliran air-lewat, Lake Kepwari, ladang batubara Collie, Western Australia	141
Studi Kasus 10: Perencanaan rehabilitasi untuk lokasi warisan Rum Jungle, Northern Territory	146
Studi Kasus 11: Perlakuan aktif air pit di lokasi warisan utama sebelum pelepasan air yang diolah ke sungai, lokasi warisan Mount Morgan, Queensland	158
Studi Kasus 12: Perlakuan aktif air tambang untuk digunakan lokasi dan untuk air minum kota, eMalahleni, Afrika Selatan	161

SAMBUTAN

Praktik Kerja Unggulan dalam Program Pembangunan Berkelanjutan dikelola oleh Komite Pengarah yang diketuai oleh Departemen Perindustrian Australia, Pariwisata dan Sumberdaya. 17 tema di dalam program ini dikembangkan oleh kelompok kerja dari perwakilan pemerintah, industri, penelitian, akademisi dan masyarakat. Buku pegangan praktik kerja unggulan tidak mungkin selesai tanpa kerjasama dan partisipasi aktif dari semua anggota kelompok kerja, dan para pemberi pekerjaan (employer) yang telah mengizinkan mereka untuk menyediakan waktu dan keahlian mereka untuk program ini. Kami amat menghargai, khususnya perusahaan pertambangan, departemen pemerintah dan organisasi lain, yang telah memberikan kontribusi studi kasus untuk memperlihatkan penerapan praktik kerja unggulan. Terima kasih khususnya kepada mereka dan organisasi yang berkontribusi pada produksi buku pegangan ini:

KONTRIBUTOR	ANGGOTA	KONTAK
	Dr David Jones Penulis Utama DR Jones Environmental Excellence	drdrjjones@gmail.com
	Dr Jeff Taylor Direktur Earth Systems	www.earthsystems.com.au
	Ms Sophie Pape Environmental Engineer Earth Systems	www.earthsystems.com.au
	Dr CD McCullough Principal Environmental Scientist Golder Associates Pty Ltd	www.golder.com
	Dr Paul Brown Penasihat Utama Rio Tinto, Melbourne	www.riotinto.com
	Dr Andrew Garvie Konsultan Utama (Geoenvironmental) SRK Consulting	www.srk.com.au
	Steve Appleyard Ahli Hidrogeologis Utama WA Department of Environmental Regulation	www.der.wa.gov.au/
	Dr Stuart Miller Kepala Penasihat Lingkungan Geochemistry International Pty Ltd	www.geochemistry.com.au
	Corinne Unger	Kasung@bigpond.com

CONTRIBUTOR	MEMBER	CONTACT
 NORTHERN TERRITORY GOVERNMENT	Tania Laurencont Ilmuwan Pertambangan Utama NT Department of Mines and Energy	www.nt.gov.au/d/Minerals_Energy
	Dr Stephen Slater DirekturStephen Slater Environmental Consulting Pty Ltd	steve.slater46@gmail.com
 THE UNIVERSITY OF QUEENSLAND AUSTRALIA	Professor David Williams Centre for Geomechanics in Mining and Construction School of Engineering The University of Queensland	www.uq.edu.au/geomechanics
 O'Kane Consultants Inc.	Peter Scott General Manager Australia, Ahli Geokimia Utama O'Kane Consultants Pty Ltd	www.okane-consultants.com
 NORTHERN TERRITORY GOVERNMENT	Mike Fawcett, Direktur Remediasi Tambang Mining Remediation Division Mines Directorate NT Department of Mines and Energy	www.nt.gov.au/d/Minerals_Energy
 NORTHERN TERRITORY GOVERNMENT	Peter Waggitt Direktur Kepatuhan Pertambangan Compliance Division Mines Directorate NT Department of Mines and Energy	
 RGS	Dr Alan Robertson Pengamat Independen Direktur/Ahli Geokimia Utama RGS Environmental Pty Ltd	www.rgsenv.com

PRAKATA

Buku pegangan dalam seri *Praktik Kerja Unggulan dalam Program Pembangunan Berkesinambungan untuk Industri Pertambangan (Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry)* telah diterbitkan untuk berbagi pengalaman dan keahlian Australia yang terkemuka di dunia dalam pengelolaan dan perencanaan tambang. Buku pegangan ini memberikan pedoman praktis tentang aspek-aspek ekonomi dan sosial dari semua tahapan ekstraksi mineral, mulai dari eksplorasi ke konstruksi, operasi dan hingga akhirnya penutupan tambang.

Australia adalah pemimpin dunia di bidang pertambangan, dan keahlian nasional kita telah digunakan untuk memastikan bahwa buku-buku pegangan ini memberikan bimbingan masa kini dan berguna pada praktik kerja unggulan.

Departemen Perindustrian, Inovasi dan Sains Australia telah memberikan manajemen teknis dan koordinasi untuk buku pegangan, bekerjasama dengan industri swasta dan para mitra pemerintah negara bagian. Program bantuan luar negeri Australia, yang dikelola oleh Departemen Luar Negeri dan Perdagangan, telah bersama-sama mendanai pembaharuan buku pegangan ini sebagai pengakuan terhadap peran utama dari sektor pertambangan dalam mendorong pertumbuhan ekonomi dan mengurangi kemiskinan.

Pertambangan adalah industri global, dan perusahaan-perusahaan Australia merupakan investor aktif serta penjelajah di hampir semua provinsi pertambangan di seluruh dunia. Pemerintah Australia mengakui bahwa industri pertambangan yang lebih baik berarti lebih banyak pertumbuhan, lapangan kerja, investasi dan perdagangan, dan bahwa manfaat ini harus mengalir melalui standar hidup yang lebih tinggi untuk semua orang.

Sebuah komitmen yang kuat untuk praktik kerja unggulan dalam pembangunan berkesinambungan sangat penting untuk keunggulan pertambangan. Dengan menerapkan praktik kerja unggulan memungkinkan perusahaan untuk memberikan nilai bertahan, menjaga reputasi mereka atas kualitas dalam iklim investasi yang kompetitif, dan memastikan dukungan yang kuat dari masyarakat setempat dan pemerintah. Memahami praktik kerja unggulan juga penting untuk mengelola risiko dan memastikan bahwa industri pertambangan memberikan potensi penuh.

Buku pegangan ini dirancang untuk memberikan informasi penting kepada operator tambang, masyarakat dan regulator. Buku-buku berisi studi kasus untuk membantu semua sektor industri pertambangan, di dalam dan di luar persyaratan yang ditetapkan oleh peraturan resmi.

Kami merekomendasikan buku-buku pegangan *Praktik kerja unggulan* ini kepada Anda dan berharap Anda akan menemukan bahwa buku-buku tersebut praktis untuk digunakan.



The Hon Matthew Canavan MP

Menteri Sumber Daya dan Australia
Utara.

The Hon Julie Bishop MP

Menteri Luar Negeri

1.0 PENDAHULUAN

Pesan-pesan kunci

- Setiap kegiatan penambangan yang memaparkan bahan yang ditambang pada udara dan air berpotensi untuk mengakibatkan pencemaran air yang terus berlanjut.
- Potensi risiko drainase tambang terkontaminasi harus dievaluasi sepenuhnya sebelum pertambangan dimulai. Fokus utama harus pada pencegahan atau meminimalkan, daripada pengumpulan dan pengolahan (treatment).
- Sedangkan biaya manajemen aktif dari limbah sulfida selama operasi untuk mencegah insepasi drainase asam dan logam (DAL) (acid and metalliferous drainage (AMD)) dapat signifikan, seringkali kecil jika dibandingkan dengan biaya jangka panjang yang dapat dikeluarkan untuk secara retroaktif menerapkan strategi pengendalian dan pengolahannya.
- Praktik kerja unggulan di area ini terus berkembang—tidak ada perbaikan cepat atau solusi satu-ukuran-sesuai-untuk semua untuk masalah DAL, dan keahlian spesialis sering dibutuhkan untuk mengembangkan strategi manajemen yang paling tepat.
- Meskipun sudah ada contoh-contoh praktik kerja unggulan di seluruh industri (lihat studi kasus dalam buku ini), prinsip-prinsip praktik kerja unggulan untuk pengelolaan risiko DAL belum dipahami atau diterapkan secara universal.

1.1 Ruang lingkup buku ini dan siapa yang harus menggunakannya

Buku pegangan ini membahas topik drainase asam dan logam (DAL), yang merupakan komponen penting dari berbagai permasalahan yang dicakup oleh Praktik kerja Unggulan dalam Program Pembangunan Berkelanjutan dalam Pertambangan. Program ini bertujuan untuk mengidentifikasi masalah-masalah utama yang mempengaruhi pembangunan berkelanjutan dalam industri pertambangan serta untuk memberikan informasi dan studi kasus yang menggambarkan pendekatan yang lebih berkelanjutan untuk industri.

Titik berat buku pegangan ini pada pencegahan produksi DAL dari keterpaparan bahan bermuatan sulfida, dilanjutkan dengan mengelola DAL yang ada, dan selanjutnya dengan pengolahan DAL. Pendekatan ini konsisten dengan hirarki kontemporer untuk pengurangan risiko.

Namun, terdapatnya bahan mineral sulfida hanya berkadar rendah, atau memang tidak ada sama sekali, tidak berarti bahwa bahan yang ditambang (atau bahan terpapar oleh pertambangan, seperti batuan dinding pit) tidak akan menghasilkan drainase, seperti drainase logam netral (NMD) (neutral metalliferous drainage) dan drainase salin (SD) (saline drainage) sebagaimana didefinisikan dalam Bagian 2, yang dapat menjadi risiko terhadap lingkungan penerima. Untuk alasan ini, setiap jenis bahan yang ditambang harus dinilai menurut kesesuaiannya masing-masing sebagai bagian dari program karakterisasi bahan tambang guna memastikan limbah dikelola dengan tepat.

Buku pegangan ini mencakup semua tahap proyek pertambangan, mulai dari eksplorasi dan studi kelayakan hingga operasi dan penutupan. Buku ini dapat diterapkan pada eksplorasi, pengoperasian dan penyelesaian/dekomisioning pertambangan, dan lokasi-lokasi brownfield (bekas tambang) dan warisan. Buku pegangan ini ditujukan terutama agar dapat menjadi sumber daya bagi manajer tambang, perencana tambang dan staf operasional lokasi yang bertanggung jawab untuk mengembangkan, melaksanakan dan melaporkan hasil rencana pengelolaan DAL. Namun, isinya juga merupakan sumber daya bagi para konsultan, pejabat pemerintah dan regulator, serta organisasi non-pemerintah (LSM), kelompok masyarakat dan siswa yang tertarik.

DAL adalah topik yang rumit, sehingga sebagian besar isinya bersifat teknis yang disediakan untuk memenuhi kebutuhan informasi bagi mereka di lokasi tambang yang bertanggung jawab untuk pengembangan dan pelaksanaan rencana pengelolaan DAL. Pengantar tingkat tinggi yang baik untuk topik, dan permasalahan manajemen penting yang perlu ditangani, dapat diperoleh dengan membaca bagian 1-3, dan pesan-pesan kunci serta elemen pengantar di setiap bagian yang selanjutnya.

- Bagian 2 menggambarkan berbagai jenis DAL dan bagaimana jenis DAL tersebut diproduksi.
- Bagian 3 adalah ikhtisar praktik kerja unggulan untuk pencegahan DAL.
- Bagian 4 menyediakan sarana untuk mengatasi masalah manajemen yang dibahas di Bagian 3 dan menjelaskan cara untuk memprediksi besarnya masalah DAL dan pemodelannya.
- Bagian 5 membahas bagaimana faktor-faktor tersebut dapat dimasukkan ke dalam penilaian risiko DAL.
- Bagian 6 menguraikan strategi untuk membatasi pembentukan dan pelepasan DAL.
- Bagian 7 menjelaskan metode pengolahan DAL yang dihasilkan.
- Bagian 8 membahas aspek regulasi dari DAL.
- Bagian 9 menjelaskan di mana, kapan dan bagaimana memantau DAL.
- Bagian 10 meneliti 'izin sosial untuk beroperasi' dan aspek komunikasi pemangku kepentingan.

1.2 Ikhtisar permasalahan

Memprediksi dan mengelola terjadinya DAL untuk meminimalkan risiko terhadap kesehatan manusia dan lingkungan merupakan salah satu tantangan utama yang dihadapi industri pertambangan. Setiap jenis pertambangan, operasi kuari (quarry) atau penggalian yang memaparkan mineral ke air dan ke udara berpotensi mengakibatkan polusi air. Seperti beberapa jenis operasi pertambangan telah berkembang dari operasi penambangan bawah tanah berkadar tinggi, bertonase rendah sampai operasi penambangan terbuka bertonase besar (dengan biasanya rasio pengupasan tinggi), kadar rendah selama 30-40 tahun, volume bahan permukaan dengan potensi menciptakan DAL telah meningkat dengan pesat.

DAL juga dapat berasal dari gangguan tanah asam sulfat, yang terjadi secara alami di lingkungan geologis muara dan rawa bakau saat ini. DAL dari sumber ini sering dikaitkan dengan pertambangan endapan pasir mineral di lokasi dekat pantai atau tempat yang secara topografi rendah. Karakterisasi dan pengelolaan bahan tanah asam sulfat dapat mirip seperti yang digunakan untuk bahan sulfida yang terkandung di lokasi-lokasi tambang.¹

Semua bahan yang bermuatan sulfida, bila terpapar air dan udara, berpotensi menghasilkan limpasan dan/atau lindi dengan peningkatan konsentrasi zat terlarut. Pertanyaan-pertanyaan utama yang akan dibahas adalah sejauh mana hal ini dapat terjadi dan apakah sedemikian besarnya risiko terhadap lingkungan sehingga perlu dikurangi untuk menghasilkan hasil yang berterima. Buku pegangan ini menyajikan:

- peralatan yang diperlukan untuk besarnya kemungkinan risiko
- strategi-strategi yang diperlukan untuk mengelola bahan galian guna mengurangi risiko ke tingkat residu yang berterima
- proses pengolahan yang dapat digunakan untuk mengobati rembesan dan limpasan berkualitas rendah, jika saat itu terjadi.

¹ Lihat Dobos (2005) dan Ahern et al. (2014) untuk Pedoman lebih lanjut.

DAL mungkin sangat masam (pH rendah) dan bermuatan konsentrasi tinggi logam, metaloid dan ion utama serta oksigen terlarut berkonsentrasi rendah. Oleh karena itu, dapat menimbulkan risiko besar bagi kehidupan air, vegetasi tepi sungai (riparian) dan penggunaan sumber daya air oleh manusia, berkilo-kilo meter sepanjang hilir dan masuk ke saluran air. Di banyak bagian dunia, masyarakat lokal tergantung pada saluran air untuk kehidupan mereka. Air bersih sangat penting untuk air minum, irigasi dan penyiraman stok, dan sangat penting untuk mempertahankan ekosistem perairan, termasuk kehidupan air yang digunakan untuk makanan.

Kegiatan penambangan di masa lalu terkadang telah merusak ekosistem dan berdampak sangat berat pada masyarakat. Kini praktik buruk seperti itu seharusnya tidak terjadi jika pertambangan berterima oleh masyarakat sebagai bagian dari kerangka kerja pengembangan berkelanjutan secara ekonomi. Keberhasilan pengelolaan DAL sangat penting untuk memastikan kegiatan penambangan memenuhi peraturan lingkungan yang semakin ketat dan harapan masyarakat, serta agar izin sosial industri untuk beroperasi dipertahankan.

Setelah operasi pertambangan berhenti, air berkualitas rendah dari produksi DAL dapat terus merusak lingkungan, kesehatan manusia dan mata pencaharian selama beberapa dekade atau bahkan berabad-abad. Sebuah lokasi tambang di Iberia Pyrite Belt di Spanyol, misalnya, telah menghasilkan DAL selama lebih dari 2.000 tahun.

Langkah penting dalam pengelolaan praktik kerja unggulan adalah untuk menilai risiko sedini mungkin. 'Risiko' termasuk lingkungan, kesehatan manusia, komersial, reputasi, hukum dan risiko regulasi. Evaluasi progresif risiko DAL, dimulai selama eksplorasi dan terus berlanjut sampai tahap evaluasi kelayakan, memberikan data yang diperlukan untuk mengukur potensi dampak dan biaya manajemen sebelum gangguan signifikan dari bahan sulfida. Saat proyek di lanjutkan di lokasi di mana DAL berpotensi risiko, upaya harus fokus pada pencegahan atau meminimalkan, bukan pada kontrol atau pengolahan.

Di lokasi tambang operasi yang telah diselesaikan dan lebih tua di mana karakterisasi bahan yang ditambang untuk potensial DAL dan/atau pengelolaan drainase yang dihasilkan kurang memadai, biaya remediasi dan pengolahan yang tinggi dapat terus mengurangi profitabilitas perusahaan yang beroperasi. Istilah 'pengolahan/pelakuan/pemrosesan selamanya (treatment in perpetuity)' telah memasuki kosakata pertambangan modern sebagai akibat masalah DAL tak terselesaikan yang menghambat pelepasan hak/kuasa sewa guna pertambangan, walaupun operasi tambang telah berhenti. Situasi ini tidak konsisten dengan praktik pertambangan yang berkelanjutan dan harus dihindari di tambang baru dengan penerapan karakterisasi bahan yang tepat dan strategi minimalisasi DAL.

Pengelolaan praktik kerja unggulan DAL terus berkembang, dan evolusi tersebut telah direkam dalam isi edisi berturut-turut seri buku pegangan ini dan di tempat lain (Jones & Taylor 2008; Jones 2011; Miller 2014). Buku pegangan ini menguraikan pendekatan praktik kerja unggulan saat ini untuk memprediksi dan meminimalkan terjadinya DAL dari perspektif pengelolaan risiko dan berisi studi kasus yang menyoroti penerapan strategi praktik kerja unggulan untuk pengelolaan limbah sulfida yang saat ini sedang, atau telah, dilakukan oleh industri. Secara khusus, sejumlah dokumen strategi studi kasus yang dilaksanakan selama masa operasi tambang (life of a mine/LoM), dan yang untuk itu pemantauan data berjangka panjang kini tersedia untuk memperagakan kinerja yang baik selama paling sedikit satu dekade. Ada juga pembaruan dari studi kasus sebelumnya yang memperlihatkan manfaat pelaksanaan awal konsep praktik unggulan. Buku ini berbeda dari dua edisi sebelumnya, yang karena kebutuhan menggunakan studi kasus strategi manajemen yang baru saja dilaksanakan dan yang kekurangan waktu untuk mengevaluasi kinerja mereka.

Spesialis yang piawai mungkin diperlukan untuk membantu merencanakan dan melaksanakan berbagai strategi yang dijelaskan dalam buku ini. Sangatlah penting untuk mencari nasihat pakar selama proses karakterisasi dan prediksi (Bagian 4), dalam menilai risiko yang ditimbulkan oleh DAL (Bagian 5), dan sebelum penyeleksian dan pelaksanaan meminimalkan dan pengendalian strategi jangka panjang (Bagian 6) .

1.3 Pembangunan berkelanjutan

Berdasarkan definisi Komisi Brundtland yang diterima secara luas (UNWCED 1987), pembangunan berkelanjutan adalah 'pembangunan yang memenuhi kebutuhan saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka sendiri'. Dalam beberapa tahun terakhir, prinsip-prinsip pembangunan berkelanjutan telah diterapkan untuk sektor pertambangan oleh pemerintah dan kelompok-kelompok masyarakat dan LSM maupun oleh industri pertambangan itu sendiri.

Untuk menyediakan kerangka kerja guna mengartikulasikan dan melaksanakan komitmen industri pertambangan untuk pembangunan berkelanjutan, Dewan Mineral Australia (MCA) yang mengembangkan *Nilai Bertahan: Kerangka Kerja Industri Mineral Australia untuk Pembangunan Berkelanjutan (Enduring Value: the Australian minerals industry framework for sustainable development)*. Kerangka kerja ini awalnya dikeluarkan pada tahun 2005 dan diperbaharui pada tahun 2015 (MCA 2015a). Nilai bertahan secara khusus ditujukan guna mendukung perusahaan untuk melampaui kepatuhan terhadap peraturan dan untuk mempertahankan serta meningkatkan izin sosial untuk beroperasi. Pendekatan perbaikan berkesinambungan berbasis risiko nilai bertahan tercermin dalam buku pegangan ini.

Pedoman komprehensif tentang praktik-praktik pertambangan yang berkelanjutan dan strategi untuk keterlibatan masyarakat yang lebih efektif juga telah dikeluarkan oleh Bank Dunia (2007) dan Dewan Internasional Pertambangan dan Logam (International Council on Mining and Metals) (ICMM 2008).

1.3.1 Lingkungan dan masyarakat

Para pemangku kepentingan dan masyarakat yang terlibat langsung serta anggota masyarakat yang mungkin secara tidak langsung dipengaruhi oleh pertambangan sering memberi penekanan yang berbeda pada aspek sosial, lingkungan dan ekonomi keberlanjutan. Misalnya, masalah budaya dan sosial mungkin lebih penting untuk masyarakat asli/pribumi/adat (indigenous). Beberapa pemangku kepentingan mungkin akan puas jika tindakan-tindakan rehabilitasi yang direkayasa untuk DAL memenuhi target kinerja selama beberapa dekade, sementara yang lain akan menuntut solusi untuk 'selamanya'. Besarnya bond (uang jaminan obligasi) atau kepastian keuangan untuk proyek-proyek pertambangan sangat besar, mengingat skala pekerjaan yang dibutuhkan dan kerangka waktu untuk memenuhi target kinerja. Masalah bond dibahas dalam Bagian 3 dari buku pegangan *Penutupan tambang* dalam seri buku pegangan ini (DIIS 2016a).

Saat mempertimbangkan implikasi lingkungan DAL dan dampak terkait tambang lainnya, prinsip umum yang digunakan oleh masyarakat, organisasi non-pemerintah dan regulator adalah 'prinsip pencegahan'. Prinsipnya didefinisikan dalam bagian 3 dari *UU Perlindungan Lingkungan dan Cagar Alam Keanekaragaman Hayati th. 1999 (Environment Protection and Biodiversity Conservation Act 1999)* (Cwlth) (EPBC Act): 'jika terdapat ancaman kerusakan lingkungan yang serius atau ireversibel (tak dapat dipulihkan), kurangnya kepastian ilmiah janganlah digunakan sebagai alasan untuk menunda tindakan pencegahan degradasi lingkungan'. Dalam praktiknya, ini berarti kurangnya bukti ilmiah untuk dampak yang nyata atau mungkin dampak yang merugikan tidak boleh digunakan untuk menyetujui suatu tindakan atau untuk mengizinkan tindakan saat mengevaluasi proposal yang berpotensi merusak lingkungan secara serius atau ireversibel untuk berlanjut. Penggunaan prinsip kehati-hatian membutuhkan pengambil keputusan untuk mengambil pendekatan berbasis risiko untuk penilaian tersebut.

Mengingat tantangan dan ketidakpastian ilmiah terkait dengan prediksi dan pengelolaan, penerapan prinsip kehati-hatian sangat penting saat kebutuhan untuk strategi pengendalian sedang dipertimbangkan.

Masyarakat yang berpotensi terpapar dampak mengharapkan keputusan tentang pengelolaan DAL akan didasarkan pada lebih dari hanya ongkos-ongkos ekonomi. Sementara keputusan pengelolaan DAL perlu diinformasikan oleh penyelidikan teknis, aspirasi dan nilai-nilai pemangku kepentingan juga harus diperhitungkan saat menerapkan perspektif perencanaan di seluruh LoM baik untuk operasi sehari-hari maupun untuk perencanaan penutupan. Dalam konteks ini, sementara kehidupan operasional LoM kebanyakan tambang biasanya diukur dalam tahun atau dekade, kehidupan efektif hidup strategi kendali dan pekerjaan remediasi

mungkin harus diukur dalam hitungan abad. Strategi pengelolaan DAL yang efektif harus mengintegrasikan aspek-aspek sosial, ekonomi dan lingkungan untuk mencapai hasil yang berkelanjutan yang berterima untuk semua yang bersangkutan (lihat studi kasus tambang Kelian 'Hubungan masyarakat dan penutupan tambang di Indonesia' di buku pegangan *Penutupan Tambang*).

Bagian 10 dari buku pegangan ini memberikan informasi lebih lanjut tentang mengkomunikasikan dan mendiskusikan permasalahan khusus-DAL dengan para pemangku kepentingan dan masyarakat yang terpapar dampak. Rujuklah buku pegangan berikut untuk informasi lebih lanjut serta pedoman tentang menangani masalah pemangku kepentingan dan masyarakat:

- *Keterlibatan dan pengembangan masyarakat* (DIIS 2016b)
- *Bekerja dengan masyarakat Pribumi* (DIIS 2016d)
- *Tanggung jawab sosial di sektor pertambangan dan logam di negara-negara berkembang* (DRET 2012)
- *Penutupan tambang* (DIIS 2016a)
- *Mengevaluasi kinerja: pemantauan dan audit* (DIIS 2016c).

1.3.2 Bisnis

Saat ini, meskipun sudah terdapat contoh praktik kerja unggulan dalam industri (lihat studi kasus dalam buku ini), prinsip-prinsip praktik kerja unggulan untuk pengelolaan risiko DAL belum dipahami atau diterapkan secara universal.

Kerangka kerja *Nilai bertahan* MCA (MCA 2015a) memberikan perusahaan pertambangan visi untuk pembangunan berkelanjutan serta Pedoman tentang implementasi praktis. Perusahaan praktik kerja unggulan juga telah menargetkan kebijakan dan prosedur yang relevan untuk mengelola DAL yang mengikat manajemen, karyawan dan kontraktor. Komitmen tambahan untuk sertifikasi lingkungan, partisipasi dalam prakarsa, seperti Jaringan Kerja Internasional untuk Pencegahan Asam (International Network for Acid Prevention) (INAP), program Drainase Lingkungan Netral (Environmental Neutral Drainage) (MEND) Kanada dan Prakarsa Teknologi Drainase Asam Amerika Serikat (US Acid Drainage Technology Initiative) (ADTI), dan keterlibatan reguler ahli DAL dalam pengambilan keputusan operasional, semua mengarah ke peningkatan kinerja yang dapat lebih hemat biaya yang dapat memenuhi atau melebihi harapan pemangku kepentingan.

Sementara biaya pengelolaan DAL yang tepat yang memproduksi bahan selama operasi dapat menjadi cukup besar, seringkali kecil dibandingkan dengan biaya jangka panjang yang dinyatakan dapat dikeluarkan untuk secara retroaktif menerapkan kendali DAL dan/atau strategi pemrosesan. Ada bukti sejarah yang cukup tentang konsekuensi kegagalan dalam memprediksi dan mengelola DAL untuk operasi individu dan untuk industri pertambangan secara keseluruhan. Konsekuensinya dapat mencakup pengeluaran yang besar yang tidak terencana pada tindakan perbaikan, kerusakan reputasi, penenaan persyaratan peraturan yang lebih ketat, dan penutupan prematur akibat ketidakmampuan membiayai biaya pengelolaan lingkungan yang meningkat.

Eskalasi biaya yang tak terencana telah sering mencapai sedikitnya US\$80 juta di mana operasi harus secara retroaktif menerapkan pengelolaan dan/atau strategi pemrosesan selama tahap penutupan. Dalam kasus tambang Ok Tedi di Papua Nugini, pelaksanaan proses selama LoM untuk mengurangi muatan sulfida tailing dan meningkatkan prospek penutupan telah menelan biaya lebih dari US\$500 juta (lihat studi kasus Ok Tedi dalam Bagian 7).

Biaya tahunan pengelolaan DAL di lokasi operasi di Australia telah diperkirakan berada di urutan minimal US\$100 juta (Ciccarelli et al. 2009). Contoh lebih lanjut dari biaya pengelolaan dampak jangka pendek dan jangka panjang DAL terdapat di MEND (1995), USEPA (1997) dan Wilson et al. (2003). Telah dikemukakan bahwa total biaya global untuk kewajiban lingkungan yang terkait dengan DAL berada di urutan US \$100 milyar (Wilson 2008).

Risiko karena pengelolaan yang tidak memadai dapat menjadi besar. Selain dari skala besar serta biaya remediasi dan membersihkan jika ada yang salah, manajemen yang tidak memadai menciptakan persepsi bahwa industri

tidak mampu menghindari dampak berbahaya. Hasil ini tidak selaras dengan tujuan industri untuk kuat berkontribusi dalam pembangunan ekonomi berkelanjutan dan produktif, serta mempertahankan izin sosial untuk operasi.²

1.3.3 Pedoman internasional

Sejak edisi terakhir dari buku ini yang diterbitkan pada tahun 2007, telah ada pertumbuhan substansial dalam bahan pedoman internasional dengan fokus khusus pada permasalahan yang terkait dengan DAL.

Sebuah pedoman drainase batuan asam global internasional komprehensif yang berbasis web (GARD), diterbitkan dengan dukungan dana dari INAP, diluncurkan pada tahun 2009.³ Pedoman GARD (INAP 2009) adalah ringkasan praktik dan teknologi state-of-the-art (paling mutakhir) (dalam format Wiki berbasis web) guna membantu operator dan regulator teknologi mengatasi masalah yang berkaitan dengan oksidasi sulfida pada mineral. Khalayak sarannya adalah tenaga teknis dengan latar belakang yang memadai dalam kimia dan/atau dasar-dasar teknik dengan sedikit pengetahuan spesifik DAL.

Program MEND, yang telah beroperasi sejak tahun 1989, terus memberikan sumber daya mutakhir, menyikapi berbagai masalah yang terkait dengan prediksi dan pengelolaan DAL.⁴ Dari catatan khusus adalah *Manual prediksi untuk drainase kimia dari bahan geologis sulfida (Prediction manual for drainage chemistry from sulfidic geologic materials)* (Price 2009).

ADTI di AS mempromosikan kemajuan dalam prediksi, pencegahan, pengendalian, pengambilan sampel, pemantauan dan pengolahan drainase asam, dengan penekanan pada evaluasi dan mengembangkan hemat biaya serta metode-metode praktis drainase pencegahan asam.⁵

Suatu pendekatan inovatif telah dikembangkan oleh Dewan Teknologi dan Pengaturan antar Negara Bagian (Interstate Technology and Regulatory Council (ITRC)) di AS untuk membantu dalam pengumuman yang lebih cepat dan mengambil pendekatan pengelolaan limbah tambang baru oleh industri dan penerimaannya oleh regulator. Prakarsa ini mengakui bahwa hambatan yang signifikan pada implementasi industri atas metode remediasi baru dapat menyebabkan kelambanan peraturan dari pandangan yang berbeda di dalam dan di antara yurisdiksi tentang efektivitas metode-metode tersebut. Produk paling utama ITRC adalah kerangka kerja pedoman berbasis web yang memandu penyeleksian teknologi yang tepat untuk aplikasi tertentu.⁶ Situs web ITRC berisi pohon keputusan, ikhtisar teknologi yang dapat digunakan dan lebih dari 65 studi kasus di mana teknologi ini telah dilaksanakan.

Pedoman tentang pengelolaan DAL di Uni Eropa diterbitkan oleh Kemitraan bagi Remediasi Drainase Asam di Eropa (Partnership for Acid Drainage Remediation in Europe) (PADRE).⁷ Komisi Penelitian Air Afrika Selatan (The Water Research Commission of South Africa) telah sangat aktif selama dekade terakhir dalam mengembangkan pedoman yang berkaitan dengan pengelolaan air di perairan yang terpapar dampak DAL sebagai akibat dari berkembangnya masalah DAL di negara tersebut.⁸

Pembaruan pada pengelolaan lingkungan pertambangan secara umum dan strategi untuk keterlibatan masyarakat yang lebih efektif telah dikeluarkan oleh Korporasi Keuangan Internasional (International Finance Corporation) (IFC 2013) dan Dewan Internasional Pertambangan dan Logam (ICMM 2015).

2 Informasi lebih lanjut tentang menilai besarnya risiko yang ditimbulkan oleh DAL disediakan dalam Bagian 5.

3 Pedoman GARD, <http://www.gardguide.com>.

4 <http://mend-nedem.org>.

5 <http://acidrainage.com/index.cfm>.

6 <http://www.itrcweb.org/miningwaste-guidance>.

7 <http://www.padre.imwa.info>.

8 http://www.wrc.org.za/Pages/KH_DocumentsList.aspx?su=c7&ms=2;68.

2.0 MEMAHAMI DRAINASE ASAM DAN LOGAM

Pesan-pesan kunci

- Akronim 'DAL' didefinisikan di sini sebagai drainase asam dan logam, dan mencakup drainase asam, drainase pH tidak bermuatan logam (neutral metalliferous drainage) (NMD), dan drainase salin (saline drainage) (SD) umumnya disebabkan oleh oksidasi mineral sulfida.
- Sumber DAL dapat mencakup penimbunan batuan sisa (WRD); stockpile (timbunan) bijih; fasilitas penyimpanan tailing (TSF) dan bendungan tailing; jalan raya dan tanggul yang dibangun dengan bahan sulfida; tambang terbuka dan lubang tambang; tambang bawah tanah; tumpukan dan timbunan buangan pelindian; serta tanah asam sulfat.
- Muatan total (produk dari konsentrasi dan aliran) itulah, bukan hanya konsentrasi saja, asam, logam/metaloid dan garam dalam drainase sumber tambang yang mempengaruhi besarnya dampak dan biaya pengolahan hilir.
- DAL (seperti yang dimanifestasikan oleh NMD atau SD) masih dapat menjadi masalah bahkan jika penilaian lokasi menyimpulkan bahwa drainase dengan pH rendah tidak mungkin untuk dikembangkan.
- Potensi pembakaran spontan (self-heating/pemanasan sendiri) dan auto-ignition (penyalan sendiri) dari bahan limbah sulfida harus diperhitungkan dan dinilai di mana perlu.

2.1 Jenis-jenis DAL

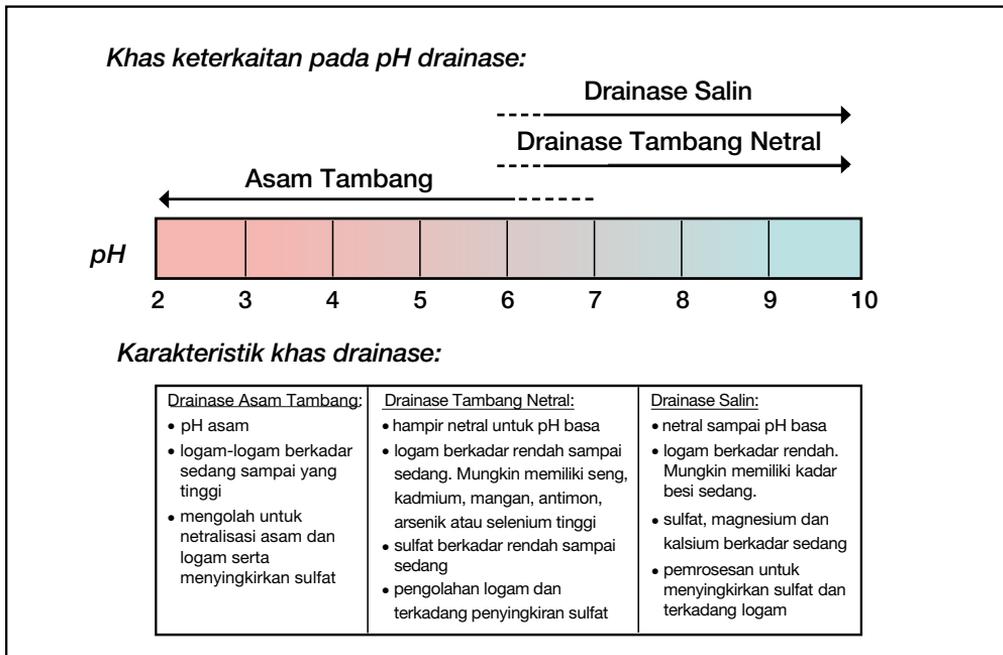
Secara tradisional DAL disebut 'drainase asam tambang' atau 'drainase batuan masam' (acid rock drainage) (ARD). Dalam buku ini, sebutan yang diperpanjang 'drainase asam dan logam' digunakan untuk secara implisit mengakui bahwa tidak semua drainase bermasalah dari oksidasi mineral sulfida bersifat masam (lihat di bawah).

Pada beberapa lokasi, drainase hampir-netral yang bermuatan konsentrasi tinggi ion utama seperti kalsium, magnesium dan sulfat dan/atau logam terlarut/metaloid (NMD dan/atau SD) dapat sama-sama sulit untuk dikelola dan diproses sebagai air masam. Di lokasi tersebut, salah satu di antara tersebut di bawah:

- keasaman yang dihasilkan oleh oksidasi utama sulfida telah dinetralsisir oleh kumpulan mineral alam atau di beberapa proses bahan kimia proses, menghapus proporsi utama dari larutan logam/metaloid, tetapi meninggalkan lindi garam yang mungkin berisi peninggian konsentrasi logam tersebut/metaloid yang larut pada nilai pH yang lebih tinggi, atau
- drainase kaya salin dan logam/metaloid telah dihasilkan oleh oksidasi sulfida logam yang tidak menghasilkan kemasaman bersih.

Spektrum jenis DAL diringkas dalam Gambar 1.

Gambar 1: Rentang jenis drainase yang dihasilkan oleh oksidasi mineral sulfida



Sumber: Diadaptasi dari Pedoman GARD; dengan izin, Jaringan Kerja Internasional untuk Pencegahan Asam.

Tabel 1 melengkapi Gambar 1 dengan meringkas berbagai nilai pH dan konsentrasi ion utama dan logam/metaloid yang ditemukan di DAL di sejumlah lokasi tambang berlogam di Northern Territory. Sedangkan konsentrasi logam sering lebih tinggi di perairan tambang yang lebih asam, yang tidak selalu terjadi.

2.2 Indikator-indikator DAL

Indikator visual DAL dapat mencakup:

- air jernih yang berwarna merah atau yang tidak wajar
- oksida besi oranye-coklat mengendap di saluran drainase (Gambar 2)
- pelapis padat filamen ganggang hijau di lapisan dasar aliran anak sungai dengan air jernih yang tidak wajar (Gambar 3)
- kematian ikan atau organisme perairan lainnya pada pencampuran DAL dengan air penerima
- pembentukan endapan pada pencampuran DAL dengan input air tanah ke saluran anak sungai atau pencampuran DAL dengan air permukaan penerima, seperti di persimpangan sungai (Gambar 4)
- produktivitas yang buruk dari daerah revegetasi (seperti tutup batuan sisa/waste rock dump (WRD))
- vegetasi menguning karena penyakit (dieback) atau tanah luka bakar (seperti daerah gundul)
- endapan garam putih atau berwarna yang terbentuk di sepanjang tepi saluran sungai dan di sepanjang ujung kaki WRD selama musim kemarau (Gambar 5).

Tabel 1: Komposisi DAL dari enam lokasi tambang berlogam di Northern Territory

ANALIT	UNIT	TAMBANG A	TAMBANG B	TAMBANG C	TAMBANG D	TAMBANG E	TAMBANG F
pH		6,6	6,0	4,2	3,7	3,2	2,1
EC	µS/cm	4118	980	1680	4080	11290	-
Besi	mg/L	<0.002	29	0.1	-	550	359
Aluminium	mg/L	0.014	0.32	7.5	217	620	116
Sulfat	mg/L	2650	590	890	4840	9080	2230
Arsenik	µg/L	4	350	83	-	250	11000
Kadmium	µg/L	140	48	-	5570	40	24
Kobalt	µg/L	15	135	-	4240	8000	258
Tembaga	µg/L	7	0.9	1450	6280	11000	6400
Mangan	µg/L	2560	2190	-	142000	74100	1910
Nikel	µg/L	572	627	-	4310	12800	810
Seng	µg/L	42600	1310	10390	131000	5330	6940

Sumber: Team NT (2004).

Gambar 2: Lapisan oranye pada batuan dan endapan terbentuk di garis drainase hilir sumber DAL



Sumber: R Jung, CSIRO.

Gambar 3: Filamen ganggang di lapisan dasar sungai



Sumber: D Jones.

Gambar 4: Endapan tembaga karbonat dihasilkan oleh netralisasi arus masuk alkalin air tanah DAL yang bermuatan tembaga



Sumber: D Jones.

Gambar 5: Garam magnesium putih kaya sulfat membentuk lereng menurun (downgradient) dari WRD tertutup dan penghijauan kembali WRD sulfida



Sumber: Departemen Pertambangan dan Energi Northern Territory.

Perlu berhati-hati di daerah beriklim agak gersang dan gersang, di mana banyak tambang Australia beroperasi. Di daerah-daerah tersebut, pelepasan air masam permukaan berlangsung hanya sebentar dan lingkungan tanah di bawah dan bersebelahan, fasilitas penyimpanan limbah (bendungan WRD dan tailing) sering menjadi reseptor utama pelimpasan dan endapan air tanah dangkal yang bermuatan DAL. Hal ini mungkin juga menjadi kasus dimana endapan pasir mineral yang didasari oleh sedimen berpasir yang sangat berpori (permeabel) tidak memungkinkan air untuk membentuk kolam pada permukaan tanah.

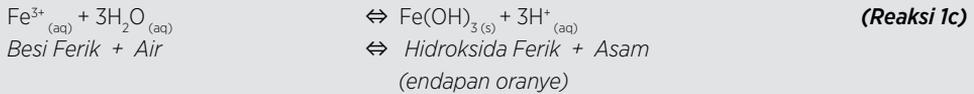
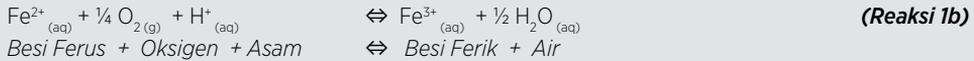
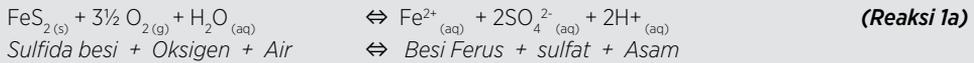
Dalam kondisi-kondisi ini, timbulnya produk oksidasi mineral sulfida pada permukaan timbunan dan perubahan kualitas air tanah memberikan indikator paling jelas bahwa DAL sedang diproduksi. Meskipun perubahan pH tidak mungkin pada awalnya ditemukan pada air tanah di bawah lokasi tambang karena efek penyangga mineral dalam akuifer, perubahan kualitas air lainnya mudah diukur dalam bor pemantauan yang memperlihatkan bahwa air tanah sedang dipengaruhi oleh DAL, yang dapat meliputi antara lain:

- penambahan progresif dalam konsentrasi sulfat atau sulfat ke rasio-massa (SO_4/Cl) dalam air tanah seiring waktu
- pengurangan progresif dalam kebasaaan air tanah seiring waktu (yang dapat dengan mudah diukur di lapangan dengan menggunakan kit uji kebasaaan)
- peningkatan progresif dalam jumlah titratable (derajat) kemasaman sampel air tanah seiring waktu (yang dapat dengan mudah diukur di lapangan menggunakan kit uji kemasaman).

Dalam kondisi di mana akuifer memiliki kapasitas daya sangga (buffer) terbatas, rembesan DAL dapat menyebabkan tanah menjadi masam dan bermuatan konsentrasi tinggi dari logam. Hal ini dapat menimbulkan risiko kesehatan bagi pengguna air tanah dan mempengaruhi ekosistem air tanah yang tergantung pada air tanah di mana lapisan air tanah dangkal atau di mana pelepasan air tanah berlangsung. Pengukuran kebasaaan dan pH air tanah dapat memperlihatkan apakah terdapat risiko signifikan bahwa air tanah di lokasi tambang akan mengoksidasi jika terpapar DAL.⁹

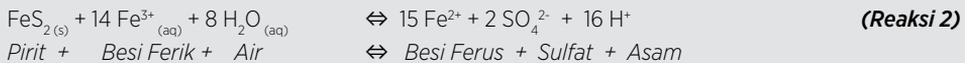
9 Pedoman tambahan tentang topik ini tersedia di situs web, <http://www.der.wa.gov.au/your-environment/acid-sulfate-soils>.

Proses-proses tersebut diperlihatkan oleh ketiga reaksi berikut:¹¹



Setelah Reaksi 1a di atas terjadi, sulit untuk menghindari oksidasi aqueous Ferrous iron (endapan besi Ferik) ke besi Ferik dan curah hujan berikutnya dari besi hidroksida (Reaksi 1b dan 1c) jika oksigen cukup hadir dan pH cukup tinggi. Tahap endapan (Reaksi 1c) adalah pembentuk-asam.

Kehadiran besi Ferik terlarut (Fe^{3+}) – biasanya saat pH kurang dari 3,5 – dapat menyebabkan percepatan penting dari proses pembentukan asam, sebagai besi Ferik yang bereaksi langsung dengan mineral besi sulfida segar (Reaksi 2). Proses ini menjelaskan mengapa oksidasi sulfida masih dapat terjadi sampai batas tertentu di kedalaman di stockpile limbah tanpa adanya oksigen, seperti besi Ferik terlarut yang meresap ke bawah ke dalam solusi melalui jalur aliran yang disukai.



Saat air masam berpindah melalui situs (misalnya, melalui batuan sisa, stockpile bijih, dinding batuan pit atau air tanah) air masam tersebut akan bereaksi dengan mineral lain dalam bahan tanah atau batuan sekitarnya dan dapat melarutkan berbagai logam dan garam. Asam akan semakin dinetralisir oleh mineral larut. Hal ini memiliki efek meningkatkan pH.

Namun, netralisasi asam terjadi dengan mengorbankan meningkatnya konsentrasi logam (metal kemasaman) dan garam di drainase yang dihasilkan. Pada saat persinggungan air masam aluminosilikat umum (seperti klorit, muscovite) atau mineral sulfida lainnya, dihasilkan disolusi sebagian dari mineral dan netralisasi kemasaman. Sementara yang diinginkan kenaikan pH, tetapi bukan kenaikan terkait dalam logam terlarut dan konsentrasi garam terlarut. Pada akhirnya jika pH naik cukup tinggi, dihasilkan drainase tambang netral pH. Drainase tersebut dapat bermuatan konsentrasi tinggi ion utama (salinitas) dan logam (misalnya, Cd, Co, Mn, Mo, Ni, Zn) dan metaloid (B, As, dan Se) yang tetap larut dalam kondisi pH tersebut (yaitu NMD).

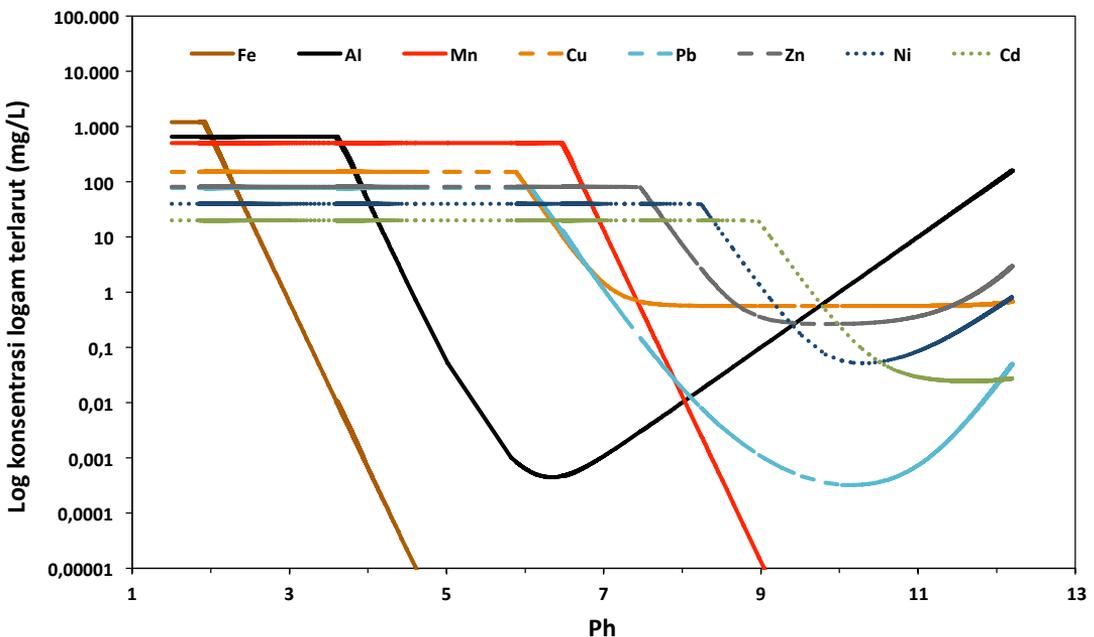
Di banyak lokasi, tidak terdapat cukup kapasitas penetral alami dalam bahan geologi untuk menaikkan pH drainase ke tingkat hampir-netral. Akibatnya, drainase yang dikarakterisasi dengan pH berkadar rendah dan peningkatan konsentrasi logam/metaloid adalah bentuk yang paling umum DAL di lokasi tambang

¹¹ Reaksi-reaksi ini, bila dikombinasikan, setara dengan Reaksi 1.

2.3.1 Drainase bermuatan logam netral (NMD/Neutral metalliferous drainage)

Dalam beberapa kasus, asam yang dihasilkan benar-benar dinetralkan oleh larutnya mineral karbonat umum seperti kalsit, dolomit, ankerit dan magnesium. Karena solubilitas kebanyakan logam tergantung pH (pH dependent), proses netralisasi dapat menyebabkan pengendapan logam seperti aluminium, tembaga dan timah, dan dengan demikian penyingkirannya dari drainase. Namun, pada pH yang hampir-netral, konsentrasi elemen seperti, As, Cd, Mn, Ni dan Zn dapat tetap tinggi, sehingga menghasilkan NMD. Seperti halnya dengan DAL, NMD juga dapat bermuatan salinitas (sulfat) tinggi. Gambar 6 memberikan contoh pengaruh pH pada solubilitas logam dalam sampel nyata DAL. Perhatikan bahwa pengaruh yang tepat dari pH tergantung pada komposisi awal DAL, karena terdapat proses sekunder seperti co-endapan dan adsorpsi yang juga mengontrol kelarutan logam dan metaloid (McLean & Bledsoe 1992).

Gambar 6: Pengaruh pH (titrasi dengan kalsium hidroksida) pada konsentrasi logam terlarut dalam air terpengaruh DAL (AMD affected) dari tambang logam dasar



Catatan: Sebuah skala konsentrasi logaritmik digunakan untuk menangkap serangkaian lengkap perilaku.

Sumber: Sistem Bumi.

NMD kurang sering terjadi dibandingkan air masam, karena persyaratan untuk mineral sulfida tertentu (misalnya, sfalerit dan galena) dan/atau kelebihan mineral karbonat lokal yang menetralkan asam, tetapi hanya sebagian endapan logam/metaloid penting yang ramah lingkungan.

2.3.2 Drainase salin

Dalam situasi di mana drainase asam benar-benar dinetralkan oleh sumber daya lokal karbonat dan drainase yang dihasilkan tidak bermuatan konsentrasi signifikan sisa logam, potensi tetap ada untuk drainase menjadi masalah salinitas berdasarkan peningkatan konsentrasi magnesium, kalsium dan sulfat. Salinitas sulfat dari drainase ternetralkan terutama tergantung pada proporsi relatif kalsium dan magnesium dalam bahan penetral karbonat. Jika mineral magnesium adalah komponen dominan dari bahan penetral, salinitas tinggi lebih mungkin menjadi

masalah karena kelarutan tinggi magnesium sulfat. Sebaliknya, jika kalsium merupakan komponen yang dominan, pengendapan larutan gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dapat mengakibatkan tingkat salinitas lebih rendah.

SD yang dihasilkan khusus sebagai hasil dari oksidasi sulfida relatif jarang terjadi dibandingkan dengan DAL dan NMD. Namun demikian, salinitas sulfat dapat menjadi indikator awal yang penting untuk mengembangkan DAL di lokasi tambang dan mungkin memerlukan strategi pengolahan yang sama (yaitu, kendali terhadap oksidasi sulfida).

Khususnya, SD juga dapat sebagai hasil estuarina/muara langkah-langkah batubara. Salinitas sodium klorid yang berasal dari laut merupakan fitur dari banyak tambang di Bowen Basin di Queensland, dan bukanlah produk dari oksidasi sulfida. Namun, sama dengan SD yang dihasilkan dari sumber sulfida, salinitas ini masih perlu dikelola dalam konteks dampak kumulatif dari DAS (sungai daerah tangkapan air) yang berpotensi terpapar dampak (EHP 2013).

2.4 Pembakaran spontan (self-heating) dan penyalan-otomatis (auto-ignition)

Jika pembakaran spontan terjadi, laju produksi produk oksidasi yang mudah larut dapat sangat dipercepat dibandingkan dengan yang diharapkan pada suhu ruang, dan produk reaksi tambahan dapat dihasilkan yang akan memberikan kontribusi lebih lanjut bagi muatan zat yang mudah larut diangkut oleh infiltrasi air melalui bahan.

Oksidasi sulfida besi adalah proses eksotermik (pembentuk-panas). Semakin cepat tingkat reaksi, semakin besar laju produksi panas. Dalam keadaan tertentu, laju produksi panas oleh massa pengoksidasi material yang bermuatan sulfida (limbah, bijih atau konsentrasi) dapat melebihi tingkat kehilangan panas. Jika ini terjadi, suhu dapat meningkat sehingga massa memantik dan gas belerang dioksida terlepas ke atmosfer.

Proses ini dapat diperburuk dengan adanya sumber karbon (misalnya, serpih grafit atau batubara) yang menyediakan bahan bakar tambahan. Kondisi ini terjadi pada adanya massa halus pirit dalam serpih McRae di sejumlah tambang bijih besi di wilayah Pilbara Western Australia¹² dan beberapa lapisan batubara di Hunter dan Lithgow wilayah New South Wales. Dalam tambang batubara, proses ini secara luas dikenal sebagai 'pembakaran spontan'. Tailing yang bermuatan jumlah yang cukup dari pirit juga dapat rentan terhadap pembakaran spontan jika materi yang dibiarkan kering bersentuhan dengan atmosfer.

Kedua (kurang umum) jenis pembentukan-panas disebabkan oleh proses galvanis (Payant et al. 2011). Dalam hal ini, kombinasi sulfida yang berbeda (biasanya berbutir halus) hadir dalam tubuh bijih berlaku seperti baterai konslet, menghasilkan panas. Jika tingkat pemanasan galvanik lebih besar dari tingkat kehilangan panas, maka pembakaran spontan dapat terjadi. Kombinasi dari beberapa sulfida mungkin sekali menjalani pembakaran spontan oleh mekanisme galvanis ini adalah pirit-galena, dan pirit-sfalerit terjadi dalam tubuh bijih sulfida masif.

2.5 Asam dan kemasaman

Konsentrasi ion hidrogen bebas (asam) dalam larutan diukur dengan pH. Namun, total kemasaman drainase tambang terdiri dari kedua ion hidrogen dan kemasaman (atau laten) mineral. Kemasaman mineral atau laten mengacu pada kemungkinan konsentrasi ion hidrogen yang dapat dihasilkan oleh endapan berbagai hidroksida logam dengan oksidasi atau netralisasi. Misalnya, Reaksi 1c di atas menggambarkan kemasaman laten yang dilepaskan sebagai besi Ferik diubah menjadi besi hidroksida.

¹² Lihat studi kasus di Bagian 5 dan Waters and O'Kane (2003).

Secara umum, kemasaman meningkat saat pH menurun, namun tidak selalu ada hubungan langsung antara jumlah kemasaman dan pH. Dalam konteks ini, adalah mungkin untuk memiliki DAL dengan kemasaman tinggi karena keberadaan logam terlarut, tetapi dengan nilai pH netral. Oleh karena itu penting untuk mengukur kontribusi dari kedua konsentrasi ion hidrogen (asam) dan kontribusi logam terlarut (laten kemasaman) untuk menentukan jumlah kemasaman (asam + kemasaman laten) yang ada. Kemasaman umumnya dinyatakan sebagai massa jenis kalsium karbonat (CaCO_3) setara per unit volume (misalnya, mg CaCO_3 /liter) dibutuhkan untuk menetralkan asam.

Konsentrasi asam bebas dapat dengan mudah diukur di lapangan menggunakan probe pH dikalibrasi. Kemasaman total juga dapat diukur di lapangan atau di laboratorium (misalnya, dengan titrasi dengan larutan natrium hidroksida) atau menggunakan kit uji murah tersedia secara komersial. Kemasaman dapat diperkirakan dari data kualitas-air dengan menggunakan formula seperti Persamaan 1 di bawah ini, yang secara luas sesuai untuk drainase tambang batubara.¹³ Jika input data kualitas-air yang lebih komprehensif tersedia, shareware seperti AMDTreat atau ABATES dapat digunakan untuk mendapatkan estimasi yang lebih akurat dari jumlah kemasaman (lihat Glosarium).

$$\begin{aligned} \text{Kemasaman (mg/L CaCO}_3\text{)} = & 50 \times \{3 \times [\text{Jumlah yang dapat larut (soluble) Fe}] / 56 \\ & + 3 \times [\text{Al}^{3+}] / 27 \\ & + 2 \times [\text{Mn}^{2+}] / 55 \\ & + 1000 \times 10^{-(\text{pH})}\} \end{aligned} \quad \text{(Persamaan 1)}$$

Catatan: [] memperlihatkan konsentrasi, mg/L

2.6 Muatan kemasaman

Muatan kemasaman adalah produk dari jumlah kemasaman (asam + laten kemasaman) dan laju/tingkat (atau volume) aliran dan dinyatakan sebagai 'massa CaCO_3 ekuivalen per unit waktu' (atau CaCO_3 massa setara untuk volume tertentu air). Jika laju aliran atau data volume tersedia, maka nilai-nilai kemasaman yang diukur atau diperkirakan dapat dikonversi menjadi muatan kemasaman seperti yang diperlihatkan pada Persamaan 2, atau menggunakan ABATES atau AMDTreat shareware.

$$\begin{aligned} \text{Muatan kemasaman (CaCO}_3\text{/ton hari)} = & 10^{-9} \times 86.400 \text{ (faktor konversi)} \\ & \times \text{Laju aliran (L/s)} \times \text{Kemasaman (mg/L CaCO}_3\text{)} \end{aligned} \quad \text{(Persamaan 2a)}$$

atau...

$$\begin{aligned} \text{Muatan kemasaman (CaCO}_3\text{ ton)} = & 10^{-9} \text{ (faktor konversi)} \\ & \times \text{Volume (L)} \times \text{Kemasaman (mg/L CaCO}_3\text{)} \end{aligned} \quad \text{(Persamaan 2b)}$$

Muatan kemasaman adalah ukuran utama dari potensi Dampak DAL di lokasi tambang. Akibatnya, perencanaan pengelolaan perlu fokus pada daerah-daerah dari lokasi yang berpotensi dapat melepaskan muatan kemasaman terbesar.

Biasanya untuk lokasi tambang operasi, limbah yang terpapar udara dan air (misalnya, menemukan WRD, stockpile bijih dan dinding pit) memberikan potensi sumber terbesar dari muatan asam. Tailing tidak mungkin menjadi sumber DAL selama masa operasi tambang karena sirkuit tailing biasanya dioperasikan pada pH tinggi, tailing yang masuk dapat dibanjiri dengan tailing segar, dan sebagian besar bahan sulfidik terkandung umumnya

¹³ Persamaan 1 berlaku untuk lokasi seperti tambang batubara yang Fe, Al dan Mn merupakan komponen dominan kemasaman.

dipertahankan dalam kondisi jenuh air. Namun, tailing dapat menjadi sumber operasional NMD dan/atau SD, baik dari sulfat atau dari ion-ion utama lainnya dan logam/metaloid dalam bijih atau dalam cairan proses, termasuk bentuk sianida.¹⁴

Setelah dekomisioning TSF, lapisan air tanah akan menurun dan lapisan permukaan tailing dapat desaturasi, dan hasilnya lambat laun paparan oksigen dan migrasi dari depan yang teroksidasi sampai ke tailing. Dengan demikian, potensi tailing menjadi sumber muatan kemasaman di masa depan harus ditangani sebagai bagian dari perencanaan penutupan tambang.

2.7 Sumber-sumber DAL

Untuk menilai muatan kemasaman yang akan diproduksi di lokasi, hal yang penting adalah memiliki pemahaman yang baik mengenai karakteristik geologi, mineralogi dan geokimia lokal (Bagian 4) dari semua bahan yang terpapar, ditangani atau diproses selama operasi pertambangan. Paparan bahan terkonsolidasi (seperti batuan sisa dan tailing) atau batuan dasar (seperti dinding pit atau pekerjaan bawah tanah) ke udara dan air berpotensi untuk menghasilkan DAL.

Karbonat umumnya hanya mineral alkali yang dapat terjadi secara alami dalam jumlah yang cukup untuk secara efektif menetralkan kemasaman dan menurunkan konsentrasi logam dalam jangka pendek. Mineral silikat dan aluminosilikat (misalnya, biotit dan klorit) memiliki kapasitas netralisasi intrinsik signifikan, namun tingkat reaksi yang lambat dapat membuat tidak efektif dalam jangka pendek. Ketergantungan pada adanya mineral aluminosilikat untuk menetralkan kemasaman, misalnya, umumnya tidak dianjurkan karena risiko yang tinggi konsentrasi kelarutan Al (yang dihasilkan oleh dekomposisi dari aluminosilikat pada pH asam) akan dilepas ke air permukaan dan air limpasan dan air tanah.

Namun, tidak semua mineral sulfida menghasilkan drainase asam; juga tidak semua mineral karbonat secara efektif menetralkan kemasamannya. Seperti disebutkan di atas, drainase berkualitas rendah juga dapat bertahan pada pH mendekati netral karena peningkatan konsentrasi logam/metaloid (lihat Bagian 2.3.1).

Penilaian satuan batuan litologi geologis dari tubuh bijih dan sekitarnya serta aliran proses di sirkuit ekstraksi mineral, penting untuk mendukung pengembangan strategi pengelolaan yang efektif untuk menangani limbah tambang sulfida. Mungkin dapat juga misalnya, menerapkan strategi seperti pemisahan, penempatan selektif, pembuangan gabungan atau pencampuran dan/atau enkapsulasi sebagai bahan limbah sedang ditaruh selama LoM (Bagian 6). Pengelolaan proaktif seperti itu dapat secara substansial mengurangi warisan DAL masa LoM, saat hal itu dapat dilakukan dengan biaya yang paling efektif.

Tujuan keseluruhan dari strategi pengelolaan harus untuk meminimalkan atau, jika memungkinkan, menghilangkan paparan ke udara dan/atau air bahan sulfidik reaktif, sekarang dan di masa depan. Ini hanya dapat dicapai jika perencana lokasi dan manajer memiliki pemahaman yang menyeluruh tentang risiko bahan terganggu DAL (atau terpapar udara) sebagai akibat dari penambangan dan mengintegrasikan manajemen dan mitigasi strategi yang tepat dalam rencana tambang.

¹⁴ Lihat buku pegangan dalam seri ini *Pengelolaan tailing* (DIIS 2016 e) dan *Pengelolaan sianida* (DRET 2008).

2.7.1 Timbunan-timbunan batuan sisa

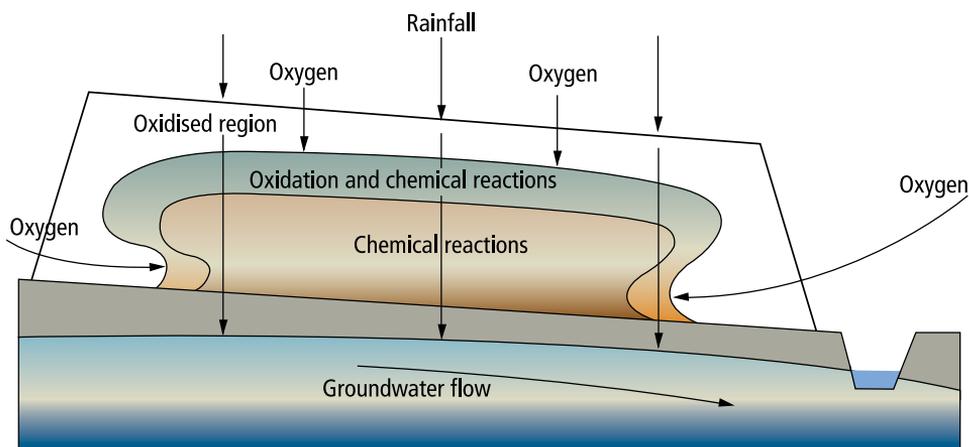
WRD umumnya ditempatkan di atas tanah, di mana sebagian besar materi tetap tak jenuh, bermuatan sekitar 5–10% air, terlepas dari pengaturan tergantung iklim. Dalam iklim semi-kering di mana banyak tambang Australia beroperasi, batuan sisa hanya dapat basah sampai sekitar 5–10% air. Dalam iklim yang lebih basah Tasmania barat dan Northern Australia, batuan sisa mungkin lebih tinggi kebasahannya, terutama di Northern Australia selama musim hujan yang ekstrim, sehingga pembentukan peninggian lapisan air tanah atau lapisan air tanah yang menumpuk dalam WRD dan produksi berikutnya rembesan dari WRD.

Alternatif lain, batuan sisa dapat ikut dilepaskan bersama tailing atau dikembalikan ke pit atau ditambang keluar tambang bawah tanah, di mana mungkin sebagian atau seluruhnya terendam. Situasi peralihan disediakan oleh valley-fill (lembah pembuangan) untuk timbunan batuan sisa, di mana dasar dan batas lateral limbah dapat terpapar air lagi. Dalam setiap kasus ini, setiap zona yang tidak jenuh dari batuan sisa sulfida rentan terhadap oksidasi. DAL dapat merembes dari ujung kaki WRD atau berpindah tempat di bawahnya ke dalam air tanah. Hal ini dapat berdampak buruk pada kualitas air selama operasi dan setelah penutupan.

Proses pengendalian pembentukan DAL dan transportasi untuk WRD terlihat secara skematis dalam Gambar 7. Perilaku suatu sistem tidak hanya bergantung pada bahan sifat mineralogi dan geokimia materialnya, tetapi juga tentang sifat fisik seperti porositas, ukuran butir (area permukaan), koefisien difusi, permeabilitas gas, konduktivitas hidrolik dan konduktivitas termal. Banyak parameter ini berubah seiring waktu sebagai akibat dari proses fisik dan kimia di lokasi. Perjalanan waktu produk akumulasi oksidasi sulfida dan tingkat berikutnya pelindiannya (leaching) diilustrasikan pada Gambar 8.

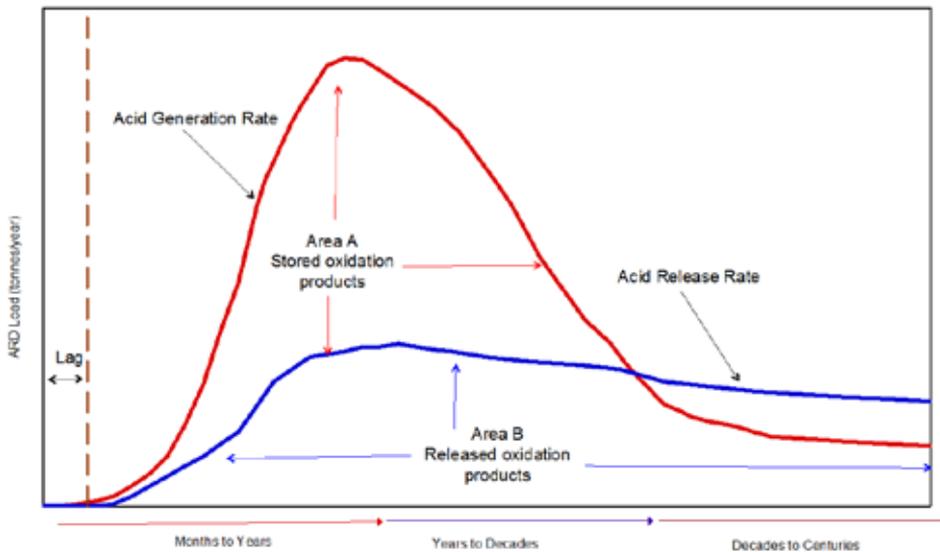
Lokasi geografis menentukan pentingnya faktor pendorong seperti curah hujan, suhu, angin, vegetasi dan sejauh mana variasi musiman di masing-masing faktor tersebut.

Gambar 7: Skema representasi pembentukan dan migrasi polutan DAL dari WRD



Sumber: Ritchie (1994).

Gambar 8: Skema waktu evolusi pembentukan produk oksidasi DAL dan pelepasan dari suatu fasilitas penyimpanan limbah



Sumber: Miller (2014).

2.7.2 Stockpile bijih

Stockpile bijih batubara kasar (ROM) (run-of-mine) secara fisik mirip, meskipun biasanya jauh lebih kecil dari, WRD. Namun, konsentrasi sulfida dapat lebih tinggi daripada limbah. Karena paparan rata-rata bijih umumnya relatif singkat sebagai bahan yang direklamasi untuk pengolahan, ada periode lebih pendek dari waktu yang tersedia untuk awalnya dan evolusi proses DAL. Namun, dalam keadaan tertentu di mana bijih sangat reaktif, atau rentan terhadap pembakaran spontan, perhatian khusus harus diberikan untuk meminimalkan waktu tinggal bijih di stockpile (dari perspektif pemulihan sumber daya maupun pengelolaan DAL).

2.7.3 Stockpile bijih berkadar rendah

Berbeda dengan stockpile bijih ROM, stockpile bijih berkadar rendah dapat berada selama beberapa dekade, tergantung pada harga logam. Sehingga timbunan stok tersebut berpotensi sumber DAL berjangka panjang. Perlu memperhatikan manajemen interim yang efektif (misalnya, meliputi geomembran untuk mencegah infiltrasi curah hujan dan batas masuknya oksigen) dan metode pembangunan stockpile tersebut (lihat Bagian 6), karena timbunan tersebut dapat menghasilkan air berkualitas buruk dalam jumlah besar ke sirkuit pengelolaan air lokasi. Selain masalah kualitas air, oksidasi sulfida yang terkandung dapat mengakibatkan penurunan kadar bijih yang ditimbun, mengubah karakteristik materialnya sehingga tidak dapat lagi diproses secara ekonomis, atau keduanya. Jika bijih stockpile kadar rendah tidak diproses pada akhir kehidupan tambang, bahan tersebut perlu dikelola dengan tepat (misalnya, dengan penggabungan dalam WRD tertutup) untuk meminimalkan risiko DAL masa depan.

2.7.4 Tempat penyimpanan tailing dan bendungan tailing

Tailing yang dihasilkan selama pemrosesan bijih biasanya ditempatkan di TSF dalam bentuk bubur. Tailing bersulfida dapat menjadi sumber DAL masa depan yang signifikan karena ukuran partikelnya yang halus.

Rembesan dari TSF umumnya ke air tanah, sementara air permukaan sering digunakan kembali di lokasi (selama operasi) atau dapat dilepaskan melalui struktur spillway (setelah penutupan). DAL yang dihasilkan di TSF dapat mempengaruhi baik air permukaan maupun kualitas air tanah, di dalam dan di luar lokasi. Besarnya masalah ini harus diminimalkan dengan menerapkan strategi rehabilitasi yang tepat.¹⁵

2.7.5 Pit-pit atau tambang terbuka

Batuan dinding dalam pit atau tambang terbuka (open cuts)¹⁶ mungkin bermuatan mineral sulfida yang berpotensi menghasilkan DAL. Sejauh mana air tanah diturunkan sekitar pit selama pertambangan dapat mempengaruhi jumlah bahan sulfida terpapar udara dan muatan kemasaman yang dihasilkan. DAL dari batuan dinding mungkin meresap ke dalam pit atau sistem air tanah lokal. Hal ini dapat mempengaruhi kualitas air pompa dari genangan air pit atau air tanah bor selama operasi. DAL yang dihasilkan dari oksidasi batuan dinding dan di penyaluran drainase daerah tangkapan air (catchment) yang masuk ke pit juga dapat memiliki dampak jangka panjang yang signifikan terhadap kualitas air pit setelah penutupan tambang (Bagian 6).

Dalam beberapa kasus, pit dapat sebagian atau seluruhnya ditimbun dengan batuan sisa. Volume batuan sisa yang tersisa di zona bervariasi tak jenuh di atas air tanah yang diperoleh kembali di pit dapat menjadi sumber besar DAL bagi air tanah. Sumber potensial ini perlu diperhitungkan untuk memastikan bahwa hal itu tidak akan mempengaruhi tujuan penutupan.

2.7.6 Tambang bawah tanah

Masalah yang terkait dengan dinding batuan pada pekerjaan tambang bawah tanah mirip dengan yang untuk pit. Sulfida terpapar udara sebagai akibat dari pengeringan merupakan sumber potensial DAL. Hal ini dapat mempengaruhi kualitas air yang terkumpul di bawah tanah dan digunakan kembali, diolah atau dilepaskan selama operasi. Pada penyelesaian pertambangan, membanjiri tambang bawah tanah dapat mencegah pembentukan DAL lebih lanjut. Namun, rongga (void) yang sudah ditambang mungkin telah berisi air berkualitas rendah sebagai hasil dari oksidasi sulfida sebelum dan selama proses banjir dan, seperti yang tercantum dalam Bagian 2.3, oksidasi sulfida masih dapat terjadi tanpa adanya oksigen jika larutan besi Ferik ada dalam larutan tersebut. Masalah khusus yang perlu ditangani dalam konteks ini adalah potensi pelepasan air tersebut ke lereng menurun, terutama jika wilayah tambang berbukit-bukit.¹⁷

15 Pembahasan lebih lanjut tentang pengelolaan pilihan tailing bersulfida di Bagian 6.2 buku pegangan ini. *Pengelolaan tailing* dalam buku pegangan seri ini (DIIS 2016e) berisi informasi luas tentang berbagai strategi yang dapat dipergunakan di tempat dan berisi tailing untuk meminimalkan risiko lingkungan di masa depan.

16 Tambang-tambang permukaan umumnya disebut pit atau tambang terbuka. Istilah 'pit' digunakan di seluruh buku pegangan ini untuk konsistensi.

17 Lihat Bagian 6.5 untuk pembahasan lebih lanjut masalah ini.

2.7.7 Tumpukan dan timbunan pelindian

Pelindian tumpukan bijih logam dasar sulfida berkadar rendah mendapatkan perhatian baik seiring dengan matangnya teknologi dan meningkatnya ukuran operasi. Pada saat dekomisioning, sulfida tersisa yang ada dalam tumpukan material yang dikeluarkan merupakan potensi sumber DAL berjangka panjang. Adanya lapisan permeabilitas rendah yang direkayasa di bawah tumpukan resapan memungkinkan semua drainase terkumpul selama dekomisioning dan setelah penutupan, memfasilitasi pengelolaan DAL. Namun, dalam kasus operasi bioleach (pelindian mikroba) timbunan, di mana tidak ada lapisan yang efektif, pembentukan dan transportasi DAL dari bahan timbunan yang dikeluarkan ke lingkungan mungkin mirip dengan yang dari WRD sulfida. Terdapat kekurangan dalam informasi yang diterbitkan tentang keberhasilan dekomisioning dalam operasi pelindian sulfida dalam tumpukan di Australia.

2.7.8 Bahan konstruksi

Sebuah sumber DAL di tempat yang sering terabaikan adalah bahan yang digunakan untuk pembangunan alas/bantalan (pad), jalan raya dan tanggul. Memang, biasanya karakteristik kekuatan tinggi primer (unoxidised) batuan sering dipandang ideal untuk tujuan konstruksi. Terdapat banyak contoh di mana penggunaan batuan yang bermuatan sulfida untuk konstruksi telah mengakibatkan sumber DAL tersebar luas dari di lokasi tambang. Hal ini dapat menyebabkan masalah pengelolaan air operasional yang signifikan dan terutama sangat mungkin untuk meningkatkan biaya membersihkan dan merehabilitasi lokasi pada akhir LoM. Karakteristik geokimia dari semua bahan yang diusulkan untuk digunakan untuk konstruksi (termasuk untuk digunakan dalam rehabilitasi) harus dinilai terlebih dahulu guna menentukan apakah bahan tersebut secara geokimia tepat untuk tujuan.

2.8 Faktor-faktor yang mempengaruhi laju pembentukan DAL

Banyak faktor yang dapat mempengaruhi pembentukan dan transportasi DAL, dan dengan demikian konsentrasi paling utama dan muatan polutan pada titik hilir sumber. Faktor utama pendorong pembentukan DAL adalah oksidasi mineral sulfida. Perubahan kimia DAL selagi awalnya solusi yang diproduksi dari produk-produk oksidasi pindah melalui sistem dan berinteraksi dengan bahan geologi lainnya.

Faktor-faktor yang mempengaruhi oksidasi sulfida dan kelanjutannya transformasi produk-produk oksidasi mencakup:

- konsentrasi, distribusi, mineralogi dan bentuk fisik mineral sulfida
- tingkat pasokan oksigen dari atmosfer ke tempat-tempat reaksi adveksi, konveksi dan/atau difusi atau penyebaran
- komposisi kimia air pori yang bersinggungan dengan tempat-tempat reaksi, mencakup isi oksigen, pH dan rasio ion Ferus/Ferik
- suhu di lokasi reaksi
- isi air dan tingkat saturasi di lokasi reaksi
- ekologi mikrobial permukaan mineral.

Faktor-faktor yang mempengaruhi transformasi berikut dan muatan produk awal DAL mencakup:

- konsentrasi, distribusi, mineralogi dan bentuk fisik dari mineral penetralisir dan reaktif lainnya
- laju aliran dan saluran aliran air
- komposisi kimia air pori.

3.0 IKHTISAR PRAKTIK KERJA UNGGULAN UNTUK PENCEGAHAN DAL

Pesan-pesan kunci

- Karakterisasi risiko DAL harus dimulai dalam eksplorasi dan berlanjut melewati pra-kelayakan, tahap-tahap kelayakan dan operasi.
- Penambangan hanya dapat berlanjut jika investigasi yang dilakukan dalam tahap kelayakan memperlihatkan bahwa DAL dapat dikelola dari perspektif teknis, ekonomis dan reputasi, termasuk selama tahap penutupan dan setelah itu.
- Rencana pengelolaan DAL untuk lokasi operasi dan penutupan harus dikembangkan selama tahap kelayakan dan diimplementasikan dan diperbarui dalam tahap operasi dalam menanggapi peningkatan tersebut pengetahuan dan/atau perubahan dalam lingkup proyek.
- Data pemantauan harus digunakan untuk menilai secara periodik terhadap kinerja yang berkesinambungan dari strategi awal pengelolaan DAL yang diimplementasikan, dan harus dilakukan perubahan-perubahan jika kinerja yang disyaratkan tidak tercapai.
- Efektifitas strategi-strategi yang digunakan untuk manajemen operasional dan diusulkan untuk digunakan untuk minimalisasi risiko DAL pada pasca-penutupan harus diuji dengan pemodelan numerik dan divalidasi dengan pemantauan di tempat serta hasil percobaan lapangan jauh hari sebelum penutupan untuk menegaskan keefektifan kinerjanya.

Fokus bagian ini pada pengelolaan bahan tambang praktik kerja unggulan guna mencegah terjadinya DAL. Namun, pertambangan senantiasa berlangsung dalam lanskap sosial dan peraturan yang membahayakan masyarakat yang berpotensi terpapar dampak, kelompok pemangku kepentingan lain dan instansi pemerintah. Cara interaksi ini ditangani, dikelola dan dikomunikasikan juga merupakan bagian dari praktik kerja unggulan modern.¹⁸

Pengembangan tambang berlangsung melalui beberapa tahap, biasanya digambarkan sebagai eksplorasi; pra-kelayakan; kelayakan; pengembangan dan pembangunan; operasi; dan penutupan. Pemahaman yang diperlukan untuk menilai dan mengelola potensi DAL harus diperoleh sedini mungkin dalam kehidupan proyek dan lebih lanjut disempurnakan selama berjalan.¹⁹

Seperti itulah biaya yang terlibat sehingga DAL berpotensi risiko tinggi dapat menghalangi kemajuan sebuah proyek untuk melampaui tahap kelayakan dan dapat memiliki implikasi signifikan bagi kinerja proyek jika operasi diteruskan. Urutan tindakan praktik kerja unggulan diperlukan untuk meminimalkan risiko DAL di seluruh siklus LoM diringkas dalam Tabel 2 dan dibahas lebih lanjut dalam Miller (2014).

¹⁸ Aspek-aspek tersebut khusus ditangani dalam Bagian 10.

¹⁹ Metode untuk memprediksi kemungkinan besarnya masalah DAL dibahas dalam Bagian 4.

3.1 Pra-tambang

Pengambilan keputusan praktik kerja unggulan untuk DAL dimulai dengan pemahaman tentang lokasi geologi, geomorfologi dan geokimia. Suatu indikasi potensi DAL bagi jenis endapan mineral tertentu dapat diperoleh dengan mengacu pada model geo-lingkungan yang telah dikembangkan berdasarkan pengalaman luas masa lalu dalam berbagai jenis bijih (USGS 2002). Model geo-lingkungan menyediakan berbagai informasi tentang pengaturan geologi dan geokimia dari endapan mineral, pertambangan dan teknologi pengolahan mineral yang berhubungan dengan pembentukan limbah tambang, dan perilaku lingkungan endapan mineral dalam arti luas.

Hanya beberapa sumber daya mineral yang homogen, dan perlu untuk mengembangkan pemahaman meningkatnya dan batu-batuan bawaan (host rocks) pada tahap-tahap pra-penambangan guna mengidentifikasi kemungkinan bahan terpapar dan kendalanya pada operasi pertambangan (Scott et al. 1997). Untuk mengembangkan pemahaman ini, penting selama tahap pra-pertambangan agar tim proyek, termasuk ahli geologi, perencana tambang, para ilmuwan lingkungan dan ahli DAL, memastikan bahwa database geologi dan geokimia yang memadai disusun untuk memperjelas kondisi dasar dan memperkirakan risiko DAL. Persyaratan untuk program uji kerja progresif diringkas dalam Tabel 2. Metode untuk mengidentifikasi dan memprediksi DAL disediakan dalam Bagian 4.

Seperti yang diperlihatkan pada Tabel 2, rencana operasional DAL dan penutupan yang benar mengganggu risiko DAL yang teridentifikasi serta harus dikembangkan dan biaya diperkirakan untuk lokasi selama tahap kelayakan. Harus diperhatikan agar berhati-hati dalam menggunakan nilai perhitungan bersih sekarang (net present value (NPV)) untuk memutuskan antara pilihan, sebagai kesimpulan dari jenis analisis bahwa sering lebih baik untuk menunda biaya pengelolaan untuk akhir LoM. Meskipun demikian, konsekuensi dari tidak menerapkan sejak awal memakan biaya lebih tinggi, namun efektif, strategi pengendalian, dapat menjadi masalah DAL yang telah berkembang selama operasi sampai tidak ada solusi yang layak secara ekonomi. Pemisahan NPV (DNPV) mungkin menjadi metode yang lebih tepat untuk digunakan untuk tujuan ini (Espinoza & Morris 2013).

Jika terdapat risiko tinggi masalah DAL yang besar, dibutuhkan desain rinci dan estimasi biaya yang lebih meyakinkan, karena biaya yang terlibat dapat secara serius mempengaruhi ekonomi proyek. Rencana penutupan dikembangkan pada tahap kelayakan akan tetap menjadi 'dokumen hidup' dan tunduk pada tinjauan dan pembaruan berkala untuk mengatasi perubahan kondisi tambang, harapan masyarakat, masukan pemangku kepentingan dan munculnya metode pengelolaan DAL yang baru serta lebih hemat biaya seiring dengan kelanjutan tambang.

3.2 Operasi

Selama operasi, pengelolaan bahan pembentuk-asam dapat menjadi proses yang rumit yang melibatkan sejumlah strategi yang berbeda tergantung pada karakteristik dari bijih dan limbah, iklim lokal dan lanskap (Bagian 6). Sangat penting bahwa awal rencana pengelolaan DAL dikembangkan selama tahap kelayakan direvisi dan diperbarui dalam menanggapi peningkatan pengetahuan (seperti model limbah dan blok bijih yang lebih rinci) dan perubahan kondisi (misalnya, perubahan dalam distribusi jenis limbah DAL atau perubahan ruang lingkup proyek) selama operasi penambangan.

Pengelolaan DAL sehari-harinya dapat melibatkan identifikasi, karakterisasi, penjadwalan, transportasi, pemisahan, penempatan selektif, pembuangan gabungan dan terkadang pencampuran bahan sulfidik dan mengandung karbonat (carbonate-bearing), serta tingkat yang sesuai pemantauan. Proses ini harus terintegrasi dengan perencanaan dan operasi tambang, dan dapat menguras waktu dan tenaga. Namun, konsekuensi dari tidak melakukannya dapat meningkatkan biaya proyek di masa depan jika diperlukan pekerjaan mitigasi yang tak terduga sebelumnya dan pengolahan yang berkelanjutan.

Bahan untuk pembangunan dan rehabilitasi paling sering berasal dari pit dan jejak WRD, TSF dan pabrik pengolahan. Semua bahan ini harus dikarakterisasi secara kimia dan fisik serta dimasukkan ke dalam neraca bahan dan jadwal bahan yang ditambang. Mengecualikan mereka dari proses keseimbangan dan perencanaan materi merupakan salah satu akar penyebab hasil rehabilitasi yang buruk (misalnya, tanah hilang atau tidak ada bahan yang ditimbun untuk pembangunan lapisan penutup atau tameng batuan tameng lereng direhabilitasi dan saluran air).

Keberhasilan pelaksanaan rencana pengelolaan DAL membutuhkan komitmen yang serius oleh manajemen tambang dan staf serta kolaborasi positif di semua bagian yang relevan dari unit bisnis. Untuk lokasi dengan risiko DAL yang telah diidentifikasi, praktik kerja unggulan merekomendasikan pembentukan kelompok pengelolaan berdedikasi yang dipimpin oleh manajer umum operasional dan tim manajemen yang terdiri dari anggota senior dari pertambangan, perencanaan tambang, pengelolaan limbah (batuan dan tailing), pengelolaan air, dan lingkungan, dengan masukan pakar eksternal yang diperlukan.

Evaluasi kinerja in-house (Bagian 9) merupakan fungsi penting dari kelompok pengelolaan, yang ditugaskan dengan memastikan keterkinian (currency) dan strategi manajemen efektivitas DAL. Pertemuan kelompok pengelolaan DAL harus dijadwalkan setidaknya triwulanan dan termasuk pertemuan khusus diselenggarakan yang diperlukan untuk mengatasi:

- keadaan yang berubah yang dapat mengurangi efektivitas rencana pengelolaan DAL saat ini, dan/atau
- hasil pemantauan yang memperlihatkan bahwa strategi pengelolaan tidak melakukan seperti yang diharapkan.

Evaluasi kinerja harus memberikan umpan balik untuk pembaruan reguler dari rencana penutupan.²⁰ Jika strategi manajemen awalnya diusulkan ternyata tidak mampu memenuhi tujuan kinerja DAL jangka panjang, harus dikembangkan alternatif dan diimplementasikan sementara peralatan yang sesuai dan berpengalaman masih tersedia di lokasi, sehingga pendekatan alternatif dapat diimplementasikan dengan biaya terendah.

Perkembangan baru dalam teknologi pengurangan DAL harus dipertimbangkan untuk evaluasi dan pengujian sebagai bagian dari proses perencanaan pengelolaan dan penutupan DAL yang berkembang. Regulator dan kelompok masyarakat juga perlu berkonsultasi selama perencanaan penutupan sehingga kebutuhan perkembangan mereka dapat dipertimbangkan.

²⁰ Lihat Buku pegangan dalam seri ini *Mengevaluasi kinerja: pemantauan dan audit* (FIIS 2016 c) dan Penutupan tambang (DIIS 2016a).

Tabel 2: Tindakan praktik kerja unggulan untuk meminimalkan risiko DAL melalui siklus hidup tambang

Lihat Glosarium untuk definisi akronim yang digunakan dalam tabel ini dan Bagian 4 untuk rincian metode karakterisasi limbah tambang yang disebutkan.

Tahap tambang	Kategori	Tindakan-tindakan (rujuk juga bagian 5 dan 8)	Komentar
Eksplorasi: penyelidikan	Visual	Bukti DAL (misalnya mineral sulfida, noda rembesan, endapan besi dan aluminium hidroksida).	Bahkan jika tidak ada indikasi visual potensi DAL pada tahap ini, penilaian lebih lanjut masih diperlukan dan harus diperpanjang selama pengujian prospek (lihat di bawah).
	Kualitas air	Analisis air permukaan dasar dan tingkat ketinggian muka air bawah tanah dan kualitas.	
Eksplorasi: pengujian prospek	Visual	Bukti potensi DAL (seperti di atas).	Bahkan Jika tidak ada indikasi potensi risiko DAL saat itu, karakterisasi yang lebih rinci masih diperlukan karena definisi sumber daya (lihat di bawah) sebagai bahan bermasalah mungkin belum dipotong oleh pengeboran awal.
	Kualitas air dan hidrologi	Menentukan kualitas air permukaan dasar dan tingkat ketinggian muka air tanah dan kualitas.	Data dasar kualitas air dikumpulkan untuk menginformasikan perkembangan kriteria pelepasan air selanjutnya selama operasi dan sasaran kualitas air dan kriteria untuk penutupan, karena akan diperlukan untuk menampung gangguan sebelumnya di lokasi tersebut dan/atau konsentrasi logam dan garam yang terjadi secara alami.
	Geokimia (uji kerja statis pendahuluan)	Karakterisasi uji kerja geokimia statis, termasuk analisis sulfur dan karbon dalam chip bor (jika tersedia) dan satuan batuan singkapan (Bagian 4). Jika teknik seperti X-ray fluorescence (XRF) genggam digunakan oleh ahli geologi eksplorasi bor inti penilaian, sulfur dan karbon harus dimasukkan dalam suite analisis. Setidaknya 3-5 sampel perwakilan harus diuji untuk setiap tombol jenis litologi/alterasi yang diidentifikasi.	Geokimia karakterisasi dataset terbatas yang tersedia saat ini dapat memberikan beberapa indikasi potensi DAL tetapi tidak mungkin untuk memberikan dasar statistik yang kuat untuk mengevaluasi potensi atau risiko DAL.
Eksplorasi: definisi sumber	Kualitas air dan hidrologi	Seperti di atas.	Jika terdapat indikasi potensi DAL, diperlukan penyelidikan lebih terfokus pada pembangunan proyek tahap berikutnya. Bahkan jika tidak terdapat indikasi potensi risiko DAL saat itu, karakterisasi lebih lanjut akan diperlukan pada tahap kelayakan sebagai cakupan yang lebih baik dari tubuh dan limbah bijih zona yang diperoleh.
	Geologi/mineralogi	Identifikasi geologi/jenis litologi dan fase mineral dalam mineralisasi dan batuan sisa kategori menggunakan metode tradisional. Login drill core dan simpan dengan cermat sehingga material tidak berubah dan jika perlu analisis geokimia yang lebih rinci tersedia untuk masa depan.	Pada akhir tahap definisi sumber daya, harus tersedia informasi yang cukup dan akurat untuk memberikan indikasi potensi DAL dari tubuh bijih (ore berkadar tinggi dan rendah). Pengembangan bijih model blok awal dapat dilakukan jika data yang tersedia memadai (Bagian 4.4).
	Geokimia (uji kerja statis lebih rinci)	Uji kerja NAPP/NAG, termasuk analisis mineral sulfur (sebagai sulfida) dan karbon (sebagai karbonat) di chip bor untuk jenis geologi yang berbeda dan tahap mineral. Jika teknik seperti XRF handheld digunakan oleh ahli geologi eksplorasi penilaian bor inti, sulfur dan karbon harus dimasukkan dalam suite analisis. Setidaknya 5-10 sampel perwakilan harus diuji untuk setiap kunci jenis litologi/perubahan yang diidentifikasi. Perhatikan bahwa jumlah litotipe yang diidentifikasi mungkin akan meningkat pada tahap ini karena pengetahuan tentang cadangan lebih banyak. Ruang lingkup tes awal dapat dibatasi tetapi meningkatkan kerumitannya jika AMD diidentifikasi sebagai masalah.	Informasi lebih lanjut akan diperlukan di tahap berikutnya dari pengembangan proyek untuk karakterisasi batuan sisa dan proses tailing yang memadai, karena baik batas-batas operasi pertambangan maupun rincian pengolahan saat ini telah ditetapkan.

Tahap tambang	Kategori	Tindakan-tindakan (rujuk juga bagian 5 dan 8)	Komentar
	Geofisik	Metode seperti polarisasi induksi/polarisasi sendiri (IP/SP, untuk mendeteksi sulfida yang tersebar luas), magnet dan elektromagnetik (EM, untuk mendeteksi sulfida masif) dapat digunakan untuk lebih menentukan sejauh mana potensi DAL.	
Pra-kelayakan	Kualitas air dan hidrologi	Membangun kualitas dasar air (kemasaman, kebasaaan, logam/metaloid, ion utama, termasuk sulfat dan salinitas) dan nilai-nilai lingkungan air permukaan dan sumber daya air tanah berpotensi terkena proyek. Informasi ini merupakan bagian penting dari proses izin lingkungan. Mengembangkan model neraca air lokasi awal.	Potensi dampak DAL dan biaya pengelolaan terkait harus dievaluasi setidaknya pada tingkat kualitatif untuk berbagai pertambangan, pilihan pengolahan dan penutupan dengan menggunakan proses penilaian risiko/kesempatan yang didefinisikan dan tim multidisiplin teknis yang kuat. Pemilihan metode potensial penambangan dan pengolahan mineral untuk meminimalkan generasi DAL dari bahan limbah dan tailing harus dianggap sebagai bagian dari evaluasi pilihan proyek. Biaya modal indikatif dan biaya operasi dan penutupan berkelanjutan untuk mengelola DAL harus menjadi faktor dalam analisis keuangan proyek untuk membantu membedakan antara pilihan dan memastikan pendekatan proaktif untuk pengelolaan DAL. Hal ini memungkinkan pilihan proyek yang lebih disukai untuk dipilih dan dibawa ke tahap kelayakan. Opsi pilihan akan menjadi dasar untuk penerapan untuk perizinan melakukan proyek. Ada kemungkinan bahwa hasil dari penilaian pra-kelayakan akan merupakan biaya untuk mengelola risiko DAL yang dinilai terlalu tinggi secara ekonomis untuk sebuah proyek. Dianjurkan agar diadakan konsultasi dengan regulator dan masyarakat yang terkena dampak selama pra-kelayakan guna memberikan umpan balik untuk membantu pilih opsi proyek.
	Geologi/mineralogi	Mulai mengembangkan dan/atau memperbaiki model blok awal (Bagian 4.4), tergantung pada sejauh mana pemahaman deposito geologi.	
	Geokimia (uji kerja statis rinci; pendahuluan uji kerja kinetik)	Hingga beberapa ratus (tergantung pada ukuran sumber daya dan rumitnya geologi) sampel perwakilan bijih berkadar tinggi dan rendah serta batuan sisa mungkin perlu dikumpulkan untuk uji kerja geokimia statis. Jumlah sampel yang pasti tergantung pada cadangan geologi dan indikatisi risiko DAL. Jika uji kerja metalurgi dilakukan untuk langkah ini, sampel bahan potensial tailing juga harus diuji. Poin data yang cukup menunjukkan untuk mengembangkan model blok awal dengan penyebaran data geokimia statis untuk bijih, limbah dan dinding batu yang handal. Lihat Downing dan Giroux (2014) dalam Bagian 4. Idealnya, tes kinetik harus ditetapkan untuk setidaknya satu atau dua sampel yang representatif untuk setiap jenis kunci litologi/perubahan yang diidentifikasi memiliki potensi risiko DAL yang nyata (misalnya kategori tidak pasti dari uji kerja statis—Bagian 4).	
	Penilaian danau pit	Karakterisasi satuan batuan DAL yang mungkin terkena di dinding pit. Ini akan terjadi pada tingkat awal karena definisi shell (kerangka) pit tidak mungkin akan selesai sampai menjelang akhir tahap kelayakan. Pemodelan neraca air untuk menunjukkan kedalaman maksimal danau dan risiko kurasan, dan apakah danau akan tenggelam di tempat atau di lingkungan melalui aliran.	Pada tahap ini, akan diketahui apakah danau pit sedang dipertimbangkan sebagai pilihan penutupan. Informasi yang memadai harus diperoleh untuk menentukan kemungkinan risiko dan mengembangkan pilihan pengelolaan.
	Konsep rehabilitasi	Desain konseptual untuk WRD, TSF dan lubang terbuka yang membahas status pengetahuan saat ini.	Menerapkan konsep desain praktik unggulan untuk pengelolaan limbah (Bagian 6).

Tahap tambang	Kategori	Tindakan-tindakan (rujuk juga bagian 5 dan 8)	Komentar
Kelayakan	Kualitas air dan hidrologi	Memperbarui kualitas air dasar karena lebih banyak data seri waktu tersedia dan mengembangkan dan/atau memperbaiki model neraca air lokasi.	Semua data DAL harus ditinjau oleh tim multidisiplin ilmu untuk mengembangkan rencana manajemen DAL awal yang terintegrasi yang baik dengan rencana penambangan. Strategi meminimalkan DAL harus dikembangkan ke tingkat yang cukup rinci untuk memungkinkan pengaturan biaya yang realistis yang akan disusun. Manajer/ kustodian dari program karakterisasi dan rencana pengelolaan DAL harus ditentukan pada saat ini untuk memastikan akuntabilitas internal untuk proses tersebut.
	Geologi/ mineralogi	Mengembangkan dan terus menyempurnakan model blok (Bagian 4.4). Gunakan model untuk mengembangkan jadwal pertambangan limbah LoM dan mengoptimalkan rencana tambang untuk penanganan, penempatan dan pengelolaan limbah selektif. Persediaan dan penjadwalan produksi bahan tidak berbahaya yang diperlukan untuk penahanan sementara bahan DAL dan untuk rehabilitasi juga harus disertakan dalam pengembangan jadwal LoM.	Estimasi biaya pelaksanaan rencana ini harus menjadi masukan untuk biaya proyek. Sangatlah berhati-hati dalam menggunakan perhitungan NPV untuk memutuskan pilihan, karena kesimpulan jenis analisis sering agar lebih baik menunda pengeluaran untuk akhir LoM. Namun, konsekuensi dari tidak menerapkan awalnya lebih mahal, namun efektif, strategi pengendalian dapat menjadi masalah DAL yang meningkat selama operasi ke tingkat yang mungkin tidak lagi menjadi solusi ekonomi yang dapat terus. Pemisahan NPV (DNPV) mungkin metode yang lebih tepat untuk digunakan (Espinoza & Morris (2013)). Pendekatan perencanaan dan operasional untuk mengelola DAL harus terperinci secara baik dan didukung oleh argumen teknis yang nalar. Prosedur pemantauan kinerja pengelolaan DAL perlu dikembangkan. Rencana penutupan yang dianggap dapat dikerjakan dan meyakinkan harus dikembangkan. Biaya penutupan harus menjadi faktor dalam keuangan proyek, dan perlu diketahui pada +/- 30%, berdasarkan model konseptual yang disempurnakan dengan desain rinci (lihat peringatan agar berhati-hati di atas pada penggunaan perhitungan NPV).
	Geokimia (uji kerja statis dan kinetik secara rinci)	Meninjau data geokimia sebelumnya untuk bijih berkadar tinggi dan rendah, batuan sisa dan tailing dan bahan-bahan lain yang akan terganggu atau terbentuk sebagai hasil dari operasi pertambangan. Jika diperlukan, tingkatkan densitas data uji geokimia statis untuk mengembangkan atau memperbaiki model blok, dan melakukan analisis pelengkap yang cukup (mis NAPP dan NAG) untuk periksa-silang data geokimia untuk satuan batuan utama (Bagian 4). Membangun dan/atau melanjutkan uji kinetik pada batuan sisa dan sampel tailing. Uji kinetik menggunakan campuran dari bahan yang berbeda (misalnya pembentuk asam dan bahan penetral asam) dapat dibentuk untuk mengeksplorasi pilihan manajemen DAL. Masalah DAL dan teknik manajemen dari tambang lain dengan lokasi yang sama, iklim dan geologi harus ditinjau secara rinci jika tersedia. Jika masih ada data yang belum cukup untuk menilai potensi DAL dan memberikan rencana pengelolaan yang meyakinkan untuk perizinan, akan diperlukan tambahan sampling, kerja pengujian dan penyempurnaan dari model blok.	Pendekatan perencanaan dan operasional untuk mengelola DAL harus terperinci secara baik dan didukung oleh argumen teknis yang nalar. Prosedur pemantauan kinerja pengelolaan DAL perlu dikembangkan. Rencana penutupan yang dianggap dapat dikerjakan dan meyakinkan harus dikembangkan. Biaya penutupan harus menjadi faktor dalam keuangan proyek, dan perlu diketahui pada +/- 30%, berdasarkan model konseptual yang disempurnakan dengan desain rinci (lihat peringatan agar berhati-hati di atas pada penggunaan perhitungan NPV). Pendekatan teknis yang kuat dan transparansi dalam komunikasi merupakan faktor utama dalam memperlancar perizinan dan memfasilitasi kemajuan ke tahap operasi. Sebuah konsep proyek yang meminimalkan dampak dan memberikan pandangan yang aman dan stabil setelah penutupan konsisten dengan tujuan pembangunan berkelanjutan. Penyusunan suatu penilaian dampak lingkungan (environmental impact assessment (EIA)) selesai dan proses persetujuan biasanya dimulai hanya setelah akhir fase kelayakan. Pada titik ini, sebuah proyek yang lebih disukai telah dipilih tapi masih mungkin berubah pada saat pekerjaan desain akhir dan sebagai hasil dari umpan balik dari para pemangku kepentingan (masyarakat dan regulator) selama proses persetujuan. Kunci pada tahap ini adalah memiliki pemahaman yang baik tentang apa yang para pemangku kepentingan harapkan untuk pengelolaan risiko DAL.

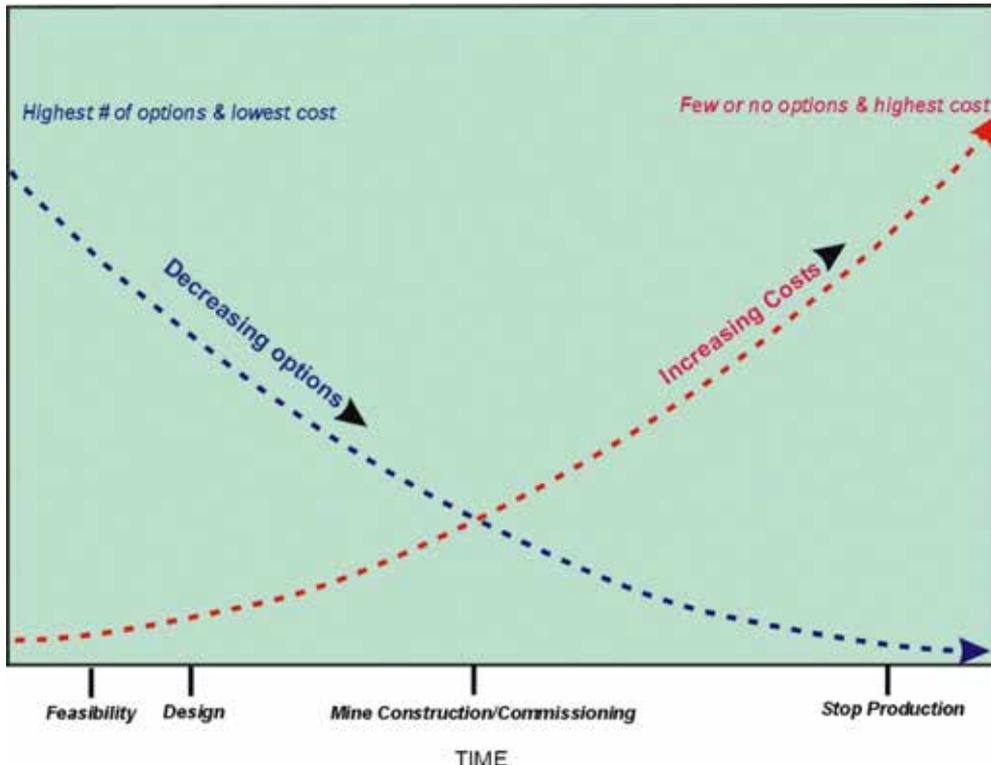
Tahap tambang	Kategori	Tindakan-tindakan (rujuk juga bagian 5 dan 8)	Komentar
	Pengelolaan operasional DAL, desain bentuk lahan konseptual dan strategi rehabilitasi	Strategi enkapsulasi limbah dan desain bentuk lahan (desain timbunan dan bendungan, lapisan penutup atau penimbunan rongga, desain pengelolaan air menjauhi atau air pompa dan olahannya? (bagian 6 dan 7)). Uji coba skala lapangan skala harus dimulai untuk menguji efektivitas strategi manajemen DAL yang diusulkan.	Tingkat teknis yang cukup kuat diperlukan untuk memberikan jaminan bahwa desain secara efektif akan mengendalikan sumber DAL dan untuk menurunkan estimasi biaya yang realistis untuk menerapkan strategi selama hidup operasional tambang dan setelah itu.
	Danau pit	Memastikan pemahaman geokimia yang baik dari batuan bawaan dan semua limbah yang akan disimpan di danau pit tangkapan. Mengevaluasi komposisi air yang akan cenderung untuk berkumpul di dasar lubang dan di permukaan saluran aliran air di dalam dan sekitar rongga pit (Bagian 6).	Kemungkinan kualitas air danau pit di masa mendatang harus dapat diprediksi pada saat ini dan dibandingkan dengan tujuan penutupan yang diusulkan untuk badan air. Penutupan tujuan mungkin perlu diubah jika mungkin kualitas air kurang jelas untuk memenuhi nilai masa depan yang ditetapkan untuk danau. Lokasi fasilitas pengelolaan limbah di daerah tangkapan danau mungkin perlu dipertimbangkan kembali (Bagian 6.6).
Operasi	Visual	Seperti di atas, namun juga di zona rembesan pada jari-jari kaki dari WRD dan stockpile bijih, dinding pit terbuka, serta tanggul dan jalan yang dibangun dari batuan yang bermuatan bahan sulfidik.	Data DAL untuk kedua batuan sisa dan tailing diperoleh sebagai bagian dari operasi pertambangan yang sedang berlangsung harus diimpor ke dalam model blok limbah, yang harus ditinjau secara berkala untuk memastikan bahwa rencana pengelolaan limbah mampu menampung perubahan signifikan (positif atau negatif) pada profil risiko lokasi DAL. Rencana penutupan harus ditinjau secara berkala untuk memastikan agar konsisten dengan profil risiko lokasi berjalan, yang mungkin telah berubah secara material sebagai akibat dari tambahan Data karakterisasi DAL atau perubahan substantif dalam lingkup proyek. Meskipun rencana penutupan harus dilihat dapat diterapkan untuk keperluan perizinan, uji coba lapangan dan penelitian lainnya perlu dilakukan selama kegiatan penambangan untuk menunjukkan kelangsungan hidup jangka panjang dari strategi yang telah diusulkan. Setiap variasi yang signifikan untuk biaya penutupan yang diproyeksikan perlu diperhitungkan dalam keuangan proyek. Biaya penutupan berdasarkan desain rinci perlu diketahui hingga +/- 15-20% dalam waktu 5 tahun dari penutupan. Sebuah proyek yang meminimalkan dampak DAL selama operasi dan setelah penutupan konsisten dengan tujuan pembangunan berkelanjutan melalui praktik. Lihat <i>Penutupan tambang dan Rehabilitasi tambang</i> dalam seri buku pegangan untuk informasi lebih lanjut tentang pengembangan rencana penutupan dan desain untuk rehabilitasi.
Kualitas air dan hidrologi	Secara berkala merevisi model neraca air lokasi untuk menggabungkan perubahan rencana pengelolaan air yang diusulkan pada awalnya dan dalam menanggapi perubahan dalam lingkup rencana tambang. Pasang bor pemantauan air tanah di jejak kaki dan lereng menurun dari WRD dan TSF untuk memberikan peringatan sebelum produksi rembesan DAL dan dampaknya pada air tanah. Melaksanakan program pemantauan kualitas air permukaan untuk program dasar yang ada.		
Geologi/mineralogi	Terus mengembangkan dan memperbaiki model blok dalam menanggapi data yang lebih komprehensif yang diproduksi selama pertambangan berlangsung. Menggunakan model blok untuk memperbaiki jadwal limbah tambang LoM dan mengoptimalkan rencana tambang untuk penanganan, penempatan dan pengelolaan limbah selektif.		

Tahap tambang	Kategori	Tindakan-tindakan (rujuk juga bagian 5 dan 8)	Komentar
	Pengelolaan DAL	Untuk meminimalkan produksi DAL, limbah harus ditempatkan sesuai dengan strategi dalam rencana pengelolaan DAL. Ini mungkin melibatkan enkapsulasi atau penempatan bawah air dari bahan yang paling reaktif, misalnya (Bagian 6).	Tinjauan berkala dan audit praktik operasi <i>harus</i> diadakan terhadap persyaratan dan tujuan rencana pengelolaan DAL. Peringatan dini data pemantauan (Bagian 9) juga harus ditinjau secara berkala untuk memastikan agar strategi manajemen yang diterapkan mencapai tujuan kinerjanya. Jika data pemantauan mengindikasikan adanya masalah yang berkembang, strategi pengelolaan limbah mungkin perlu diubah. (Bagian 9) juga harus ditinjau secara berkala untuk memastikan agar strategi pengelolaan yang diterapkan mencapai tujuan kinerjanya. Jika data pemantauan mengindikasikan adanya masalah yang berkembang, strategi pengelolaan sampah mungkin perlu diubah.
	Rehabilitasi progresif dan perencanaan penutupan	Melakukan rehabilitasi progresif di mana mungkin menggunakan sumber daya manusia dan modal yang tersedia selama tahap operasi. Rehabilitasi progresif perlu dibedakan dari pengelolaan limbah selama operasi untuk meminimalkan DAL sejak awal. Hal ini melibatkan instalasi lapisan penutup dan revegetasi dari bagian-bagian area penyimpanan limbah yang telah mencapai desain ketinggian akhir dan tidak lagi sebagai area penempatan aktif. Uji coba lapangan dari desain lapisan penutup yang diusulkan mungkin akan diperlukan untuk mengkonfirmasi perilaku (dari modeling) jangka panjang yang diharapkan. Menggunakan model prediktif untuk mengevaluasi kinerja jangka panjang yang diharapkan dari bentuk lahan (limpasan, rembesan, erosi) yang direhabilitasi dan membandingkan hasil model dengan hasil uji coba lapangan.	Rehabilitasi progresif akan mengurangi risiko jangka menengah pelindian produk DAL dari limbah. Manfaat penting rehabilitasi progresif adalah bahwa upaya yang diperlukan untuk menstabilkan lokasi akan berkurang dalam acara penutupan tak terduga atau penempatan lokasi ke perawatan dan pemeliharaan. Bahan untuk pembangunan dan rehabilitasi akan paling sering datang dari pit dan jejak dari WRD, TSF dan pabrik pengolahan. Semua bahan-bahan ini harus ditandai secara kimia dan secara fisik dan dimasukkan ke dalam neraca bahan dan jadwal materi ditimbang. Pastikan bahwa pemahaman kinerja akan kemungkinan bentuk lahan akhir limbah cukup untuk menilai besarnya risiko masa depan. Jika uji coba lapangan dari konsep desain dan/atau output pemodelan menunjukkan potensi masalah dengan kinerja, strategi rehabilitasi alternatif perlu dikembangkan.
	Danau pit	Pemahaman yang telah disempurnakan mengenai neraca dan kualitas air danau pit jangka panjang dengan memantau aliran air tanah serta kualitas dan data iklim. Perbarui prediksi kualitas air yang diperlukan. Model neraca air, menggabungkan efek-efek perubahan iklim yang diproyeksikan sampai beberapa ratus tahun. Melakukan terus penilaian kualitas air dengan menggunakan alat mulai dari model pencampuran sederhana aliran masuk (inflow) air dan persinggungan geokimia lebih rinci pada pemodelan prediktif kualitas air jika air berkualitas tinggi diperlukan untuk memenuhi tujuan penutupan.	Memastikan agar semua informasi tersedia untuk memungkinkan penilaian yang komprehensif dari risiko danau pit penutupan. Tujuan penutupan asli untuk danau pit mungkin perlu ditinjau kembali atau diubah berdasarkan temuan dari penilaian yang lebih rinci ini.
Penutupan dan penyelesaian		Rujuk <i>Penutupan tambang, Rehabilitasi tambang dan Mengevaluasi kinerja: pemantauan dan audit</i> dalam seri buku pegangan ini untuk tindakan-tindakan utama yang diperlukan selama dan pada akhir LoM untuk memastikan dampak berkelanjutan minimal pada lingkungan.	

3.3 Penutupan

Pada saat penutupan tambang, sebagian besar pekerjaan persiapan, termasuk pengembangan tujuan penutupan dan kriteria yang diperlukan untuk melindungi lingkungan ke masa depan, seharusnya dilakukan sebagai bagian dari strategi pengelolaan DAL yang dipahami dengan baik, diuji dalam uji coba lapangan dan diimplementasikan di seluruh tahap operasi. Jika itu tidak terjadi, mungkin ada risiko yang signifikan dari dampak yang merugikan, termasuk biaya yang lebih tinggi untuk retrofit solusi di tahap akhir seperti itu. Selalu, seiring waktu, jumlah pilihan yang tersedia untuk penurunan manajemen yang efektif dan biaya meningkat (Gambar 9).

Gambar 9: Hubungan antara pilihan rehabilitasi dan biaya dari waktu ke waktu



Sumber: Tim NT Toolkit (2004), milik M Fawcett.

Sebuah tinjauan dari 73 rencana penutupan tambang untuk periode 2007 hingga 2013 mencatat berapa banyak lagi waktu yang dibutuhkan perusahaan tambang untuk memenuhi tujuan penutupan mereka saat desain pengelolaan air untuk jangka panjang belum merupakan bagian integral dari perencanaan dan desain (Byrne 2013). Selanjutnya, dampak pasca-penutupan DAL telah diidentifikasi sebagai dominan dampak lingkungan utama dari lokasi tambang yang direhabilitasi (Laurence 2006). Biaya tambahan dan permasalahan lain yang terkait dengan kekurangan perencanaan penutupan di Tambang Woodcutters di Northern Territory telah dijelaskan oleh Dowd (2005). Masalah penutupan umum ditangani secara komprehensif dalam seri buku pegangan praktik kerja unggulan Penutupan tambang (DIIS 2016a).

Karena banyak teknologi pengelolaan masih relatif baru (kurang dari 30 tahun), hanya ada beberapa kasus jangka panjang yang dapat memperlihatkan keberhasilan dalam mencapai bentuk alam yang stabil dan aman lingkungan. Dalam tahap perencanaan mengarah ke desain dan implementasi dari strategi penutupan DAL, kemungkinan keberhasilan diperlihatkan dengan hasil yang diperoleh dari pemodelan prediktif dan dari uji coba lapangan. Namun, indikator utama keberhasilan akan selalu menjadi catatan pemantauan jangka panjang. Sebuah perusahaan yang beroperasi di suatu lokasi berisiko dari pasca-rehabilitasi DAL harus menyediakan

sumber daya keuangan dan teknis yang memadai untuk menjalankan program yang kuat jangka panjang pemantauan pasca-rehabilitasi (Bagian 9) dan untuk melakukan pekerjaan perbaikan jika diperlukan.

Karena akan ada jeda waktu yang lama sebelum masalah DAL menjadi jelas, perlu untuk sering memantau efektivitas sistem penampungan limbah dan dampak terhadap air permukaan dan air tanah selama bertahun-tahun sampai bukti yang baik dari kinerja tersedia dan sign-off dapat diperoleh dari regulator. Pendekatan yang bertanggung jawab tersebut akan meningkatkan reputasi industri dan membantu mempertahankan izin sosial untuk beroperasi.

Namun, alasan terbesar karena warisan pertambangan masa lalu, regulator Australia saat ini enggan untuk menerima pengembalian hak sewa pertambangan pada akhir pertambangan. Ini berarti bahwa kewajiban keuangan potensial yang terkait dengan DAL dan risiko lainnya pada lokasi tertutup dapat tetap pada neraca perusahaan untuk waktu yang lama.

Studi Kasus 1 adalah contoh praktik kerja unggulan dari penerapan paradigma perencanaan penutupan LoM di lokasi berisiko DAL. Langkah-langkah pengendalian untuk potensi limbah yang memproduksi DAL dilaksanakan dari awal dan berlanjut melalui masa operasi tambang. Sepuluh tahun pemantauan kualitas air pasca-dekomisioning memperlihatkan bahwa air yang meninggalkan lokasi telah memenuhi semua tujuan kriteria kualitas penutupan yang telah sepakati.²¹

Studi kasus 1: Perencanaan LoM untuk penutupan dan pemantauan pasca-penutupan, tambang emas Kelian, Indonesia

Konteks

Tambang emas Kelian Equatorial Mining (KEM), dioperasikan antara tahun 1992 hingga 2005 oleh Rio Tinto, terletak di Provinsi Kalimantan Timur Indonesia. Bijih ditambang dari tambang terbuka tunggal. Sebuah saluran pengalihan dibangun untuk mengarahkan jalan asli dari Sungai Kelian di sekitar lubang terbuka sementara pertambangan sedang berlangsung untuk memungkinkan perluasan pit ke utara. Emas diperoleh dari bijih yang dihancurkan dan digiling menggunakan proses pelindian sianida konvensional. Sekitar 90 juta ton tailing dan hampir 230 juta ton batuan sisa yang dihasilkan selama LoM.

Karakterisasi pekerjaan awal memperlihatkan bahwa banyak limbah mineral ini akan berpotensi membentuk asam (potentially acid forming/PAF). KEM juga menerima hampir 4m curah hujan per tahun, sehingga DAL dan pengelolaan air yang merupakan bidang fokus utama selama kedua periode operasional dan penutupan. Studi ini menjelaskan strategi manajemen proaktif DAL dilaksanakan di KEM dan penyediaan data pemantauan dari 10 tahun periode pasca-penutupan, yang memperlihatkan bahwa strategi manajemen kinerja sesuai seperti yang dirancang. Tambahan rinci disediakan dalam makalah oleh Palon (2014).

Limbah mineral berkarakteristik geokimia dan klasifikasi

Tubuh bijih Kelian adalah cadangan emas epitermal terdapat di dalam batuan vulkanik dan sedimen termasuk tuff, andesit, riolit, mudstones, siltstones dan batupasir. Pirit adalah mineral sulfida yang paling umum yang terkait dengan mineralisasi, dan sulfur total dalam limbah mineral biasanya rata-rata 2-4%. Kalsium, magnesium, besi dan mangan karbonat juga umum di batuan termineralisasi. Netralisasi asam yang diproduksi oleh rhodochrosite (MnCO_3) dapat melepaskan konsentrasi yang signifikan dari mangan ke dalam larutan. Mangan relatif larut pada pH netral dan diakui dini sebagai kontaminan utama keprihatinan di KEM.

²¹ Lihat juga Studi kasus 7 dalam Bagian 6.

Batuan sisa yang dipisahkan berdasarkan belerang, karbonat dan isi mangan diukur di laboratorium di tempat untuk memungkinkan klasifikasi cepat. Non-pembentuk asam (NAF) batuan sisa didefinisikan sebagai yang berpotensi membentuk asam negatif bersih (negative net acid producing potential (NAPP)) yang berisi mangan kurang dari 0,3%. Mineral karbonat yang dominan dalam batuan NAF yang kalsit dan dolomit, yang menyediakan kapasitas asam netralisasi lebih efektif dan tidak melepaskan mangan ke dalam larutan. Batuan sisa PAF didefinisikan sebagai memiliki NAPP positif dan/atau kadar mangan lebih besar dari 0,3%. Semua tailing yang ditunjuk dan dikelola sebagai PAF. Sekitar dua-pertiga dari tembok tinggi pit di atas lapisan air tanah pasca-tambang juga diakui sebagai PAF.

Strategi pengelolaan DAL

Mengingat iklim tropis sangat basah di KEM, strategi manajemen yang menyeluruh untuk berpotensi DAL berfokus pada pembatasan masuknya oksigen melalui pemanfaatan banjir dan pemeliharaan kondisi jenuh. Pembuangan terhubung ke dasar laut adalah strategi manajemen yang terbukti biasanya mengurangi laju oksidasi sulfida beberapa kali lipat dibandingkan dengan metode kering konvensional pembuangan limbah mineral (lihat Bab 6). Pemilahan batuan sisa dimulai pada tahun 1994 dengan batuan sisa PAF ditempatkan ke dalam bendungan batuan sisa Upper Nakan yang khusus dibangun di mana dapat cepat banjir. Kejenuhan juga dipertahankan dalam tailing PAF seluruh operasi dengan deposisi tailing di bawah laut ke kolam bendungan. Pada penutupan, limbah mineral dan area pengelolaan ARD terdapat di lokasi (Gambar 1):

1. Bendungan Tailing Namuk—Bendungan dibangun sebagai bangunan bendungan air permanen dengan inti tanah liat, kerangka berisi batuan and tirai injeksi semen yang dipasang dalam fondasi. Bangunan dan saluran limpahan dibangun dengan standard International Commission on Large Dams (ICOLD) sebagai bendungan amat berbahaya. Bangunan membendung sekitar 80 juta ton tailing PAF yang disimpan di bawah danau dangkal permanen (Gambar 2).
2. Bendungan batuan sisa Upper Nakan—interior gudang penyimpanan bermuatan sekitar 160 juta ton batuan sisa jenuh PAF ditutup dengan sekitar 1–1,5 m air. Tanggul bendungan Upper Nakan dibangun sebagai bangunan pembendung air dengan tanah liat yang dipadatkan dan inti breksi berlumpur, zona filer dan kerangka berisi batuan.
3. Batuan sisa repositori Lower Nakan—Repositori berisi lebih dari 40 juta ton yang didominasi batuan sisa NAF yang digali selama pengalihan Sungai Kelani dan dari lubang terbuka.
4. Repositori batuan sisa 1280 dan SP24—Kurang dari 10 juta ton batuan sisa didominasi PAF ditempatkan ke dalam dua repositori kecil ini pada awal pertambangan sebelum bendungan batuan sisa Upper Nakan dibangun. Repositori-repositori kecil ini ditutup dengan penutup yang berlapis-lapis yang dirancang untuk membatasi oksigen dan masuknya air.
5. Pit terbuka—Sekitar 10 juta ton tailing ditempatkan ke bagian bawah pit terbuka setelah penambangan selesai. Pit dengan cepat dibanjiri, menciptakan sebuah danau pit permanen, dan mengendalikan masuknya oksigen ke tailing pada kedalaman dan dinding pit di bawah titik tumpahan. Hanya sekitar 25 hektar dinding pit masih terkena di atas permukaan danau (Gambar 3).

Selama operasi lokasi tersebut memiliki neraca air positif dan kelebihan air yang dibutuhkan untuk dilepaskan ke Sungai Kelian. Di mana diperlukan, perairan persinggungan dari fasilitas di atas diperlakukan dengan kapur dan dibiarkan stabil dalam serangkaian kolam pengendapan. Perairan supernatan dinetralkan kemudian dicampur dalam dua kolam penyemir utama sebelum diuji untuk memenuhi kriteria kualitas air dan dilepaskan ke Sungai Kelian hilir lokasi tambang. Penambahan kapur yang terus-menerus sebagai tindakan manajemen jangka pendek selama periode pra dan pasca-penutupan langsung sebagai repositori limbah mineral banjir atau tertutup.

Kinerja pasca-penutupan

Dalam periode pasca-penutupan air dilepaskan langsung dari bendungan tailing Namuk dan bercampur dengan arus dari repositori batuan sisa dan lubang terbuka yang pertama dilepaskan melalui lahan basah besar yang dibangun (Gambar 4). Wetland ini dibangun tak lama setelah penutupan untuk penyemiran pasif (terutama untuk Mn) arus campuran sebelum dilepaskan. Arus rata-rata per tahun sekitar 1.350 L/s dari bendungan tailing Namuk dan 280 L/s dari lahan basah. Arus gabungan kemudian masuk ke kolam penyemiran terakhir sebelum dilepaskan ke Sungai Kelian dari titik pembuangan tunggal.

Kualitas air pembuangan memenuhi kadar I (air minum atau penggunaan setara) standar kualitas air sungai Indonesia tanpa perlu penambahan kapur atau bentuk lain dari pengolahan air aktif. Tabel 1 dan 2 memperlihatkan data median kualitas air bendungan tailing Namuk, dan untuk pit campuran dan keluaran batuan sisa dari lahan basah. Tabel 3 memperlihatkan kualitas air pada titik pembuangan ke Sungai Kelian setelah semua arus telah digabungkan. Data seri waktu WQ ini penting terutama karena memperlihatkan standar kepatuhan telah dipenuhi segera setelah penutupan, diikuti oleh kinerja yang berkelanjutan. Hal ini menggambarkan apa yang dapat dicapai dengan implementasi awal strategi kontrol dan perhatian yang ketat untuk pengelolaan terpadu sumber ARD potensial sepanjang LoM.

Kesimpulan

Implementasi awal strategi pengelolaan proaktif KEM memungkinkan untuk keberhasilan penutupan tambang tanpa perlu pengolahan air aktif abadi. Penggunaan lapisan air penutup dan saturasi permanen telah efektif mengendalikan oksidasi sulfida lanjut dan sangat membatasi muatan DAL dalam jejak tambang. Strategi ini telah berhasil melindungi ekosistem perairan dan sumber daya air di Sungai Kelian selama periode pasca-penutupan, sementara juga meminimalkan kewajiban keuangan pasca-penutupan. Keberhasilan penutupan KEM menyoroti pentingnya karakterisasi awal dan pilihan strategi pengendalian, diikuti oleh pelaksanaan yang efektif dan pemantauan kinerja untuk memperlihatkan keberhasilan.

Tabel 1: Bendungan tailing Namuk: median hasil pemantauan tahunan 2008-14

PARAMETER	UNIT	STANDAR KUALITAS	PEMANTAUAN TAMBANG A RATA-RATA/TAHUN						
		AIR DANAU KADAR II	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Jumlah solid terlarut	mg/L	1000	56	55	66	53	51	53	52
Jumlah solid tersuspensi	mg/L	50	7	6	8	8	4	5	7
Sulfat (SO4)	mg/L	400 ¹	16	14	11	11	12	9	TU
pH		6-9	7,12	7,11	7,31	7,11	7,12	7,00	7,24
Besi (Fe)	mg/L	1,03	0,041	0,046	0,039	0,038	0,044	0,037	0,036
Mangan (Mn)	mg/L	2	0,036	0,018	0,008	0,012	0,010	0,018	0,065
Zinc (Zn)	mg/L	0,05	0,009	0,012	0,011	0,011	0,007	0,007	0,007
Merkuri (Hg)	mg/L	0,002	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Timah (Pb)	mg/L	0,03	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Arsenik (As)	mg/L	1	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,002
Sianida total (CNT)	mg/L	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	TU
Sianida bebas (CNwad)	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	TU

TU = Tidak diukur.

Tabel 2: Sistem penganggulungan pasif wetland: hasil pemantauan tahunan rata-rata 2009-14

PARAMETER	UNIT	STANDAR KUALITAS	PEMANTAUAN TAMBANG A RATA-RATA/TAHUN					
		AIR PELEPASAN KADAR I	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Jumlah solid terlarut	mg/L	2000	1020	898	754	726	691	772
Jumlah solid tersuspensi	mg/L	200	10	8	7	5	4	7
Sulfat (SO4)	mg/L	- ¹	769	586	456	389	367	TU
pH		6-9	6,64	6,81	6,82	6,86	6,76	7,00
Besi (Fe)	mg/L	5	0,028	0,043	0,041	0,030	0,048	0,030
Mangan (Mn)	mg/L	2	0,0066	0,170	0,164	0,166	0,055	0,120
Zinc (Zn)	mg/L	5	0,031	0,024	0,012	0,007	0,008	0,005
Merkuri (Hg)	mg/L	0,002	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Timah (Pb)	mg/L	0,1	0,049	0,044	<0,001	<0,001	0,002	0,002
Arsenik (As)	mg/L	0,1	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	0,001	<0,001
Sianida total (CNT)	mg/L	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	TU
Sianida bebas (CNwad)	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	TU

TU = Tidak diukur.

¹ Tak ada standar pelepasan sulfat di lokasi ini.

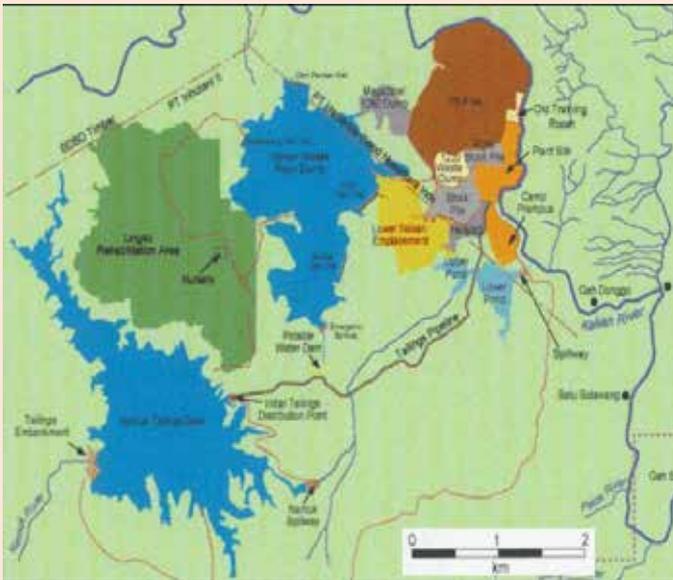
Tabel 3 – Hasil Pemantauan Tahunan untuk Pelepasan Akhir Lokasi ke Sungai Kelian rata-rata 2009-2014 (WS05)

PARAMETER	UNIT	STANDAR KUALITAS	SUNGAI KADAR I	PEMANTAUAN TAMBANG A RATA-RATA/TAHUN					
		AIR PELEPASAN KADAR I		2009	2010	2011	2012	2013	2014
Jumlah solid terlarut	mg/L	2000	1000	198	314	254	174	208	312
Jumlah solid tersuspensi	mg/L	200	50	13	12	9	8	32	10
Sulfat (SO4)	mg/L	- ¹	400	113	193	153	99	99	TU
pH		6-9	6-9	7,03	7,04	7,00	6,91	6,75	6,94
Besi (Fe)	mg/L	5	0,3	0,056	0,037	0,047	0,046	0,042	0,035
Mangan (Mn)	mg/L	2	0,5 ²	0,017	0,167	0,045	0,054	0,047	0,078
Zinc (Zn)	mg/L	5	0,05	0,010	0,013	0,011	<0,005	<0,005	<0,005
Merkuri (Hg)	mg/L	0,002	0,001	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Timah (Pb)	mg/L	0,1	0,03	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Arsenik (As)	mg/L	0,1	0,05	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
Sianida total (CNT)	mg/L	0,05	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	TU
Sianida bebas (CNwad)	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	TU

TU = Tidak diukur

¹ Tak ada standar pelepasan sulfat di lokasi ini.

² Sulfat ditentukan dari tingkat latar belakang lokasi di ANDAL (1980).



Gambar 1: Tata letak dalam operasi memperlihatkan pit terbuka (kanan atas), tempat penyimpanan batuan sisa dan bendungan tailing (kiri bawah)



Gambar 2: Area penyimpanan tailing Namuk memperlihatkan tanggul yang dibangun



Gambar 3: Pit terbuka yang dibanjiri



Gambar 4: Sistem perlakuan pasif Wetlands

REFERENSI

Palon, G (2014). Pengelolaan drainase batuan masam Tambang PT Kelian Equatorial hingga periode pasca-tambang, pada Seminar 5 tentang ARD dan Pasca Tambang di Indonesia, 27-28 Oktober 2014, Institut Teknologi Bandung, Indonesia.

4.0 MENCIRIKAN BAHAN TAMBANG DAN MEMPREDIKSI DAL

Pesan-pesan kunci

- Sains untuk memprediksi kemungkinan perluasan risiko DAL sebelum penambangan terlalu jauh maju.
- Tak ada uji tunggal karakterisasi DAL yang memadai untuk menilai sepenuhnya risiko DAL di seluruh jenis bahan yang khusus terdapat di lokasi tambang, dengan metode uji ganda yang diperlukan.
- Program sampling yang semakin terperinci dan karakterisasi diperlukan sebagai proyek dengan risiko DAL seputar eksplorasi ke tahap penambangan.
- Penting untuk mengembangkan 'model blok DAL' tiga-dimensi (lihat Glosarium dan Gambar 10) dan jadwal pengelolaan bahan limbah yang terkait jika DAL memerlukannya. Model ini harus terpadu dengan model blok bijih dan rencana penambangan guna mengoptimalkan penanganan bahan di lokasi dan mendefinisikan jenis batuan dinding pit terakhir.
- Kegagalan tambang untuk mengidentifikasi dan kemudian mengelola risiko DAL dapat dikarenakan tidak memiliki tingkat-tingkat resolusi yang mirip dengan resolusi model-model limbah dan bijih dan tidak memadukannya sedini mungkin tahap dalam proses perencanaan tambang.
- Diperlukan koordinasi erat antar antara personil yang mengembangkan model blok DAL dan perencana tambang. Jalan pintas yang diambil dalam penumpukan limbah guna mencapai penghematan dalam waktu singkat mungkin harus ditukar dengan biaya DAL selanjutnya yang berjangka panjang dan pengelolaan kualitas air.

4.1 Ikhtisar

Tujuan utama karakterisasi bahan tambang untuk menentukan:

- *seberapa besar* potensi yang dihasilkan oleh DAL
- kemungkinan *tingkat dan penentuan waktu (rate and timing)* yang dihasilkan oleh DAL
- kemungkinan kontaminan yang dikhawatirkan dalam lindi yang dihasilkan dari oksidasi bahan-bahan sulfidik.

Sangat penting agar sampling bahan tambang dan program penilaian geokimia dilakukan guna memastikan agar data yang memadai tersedia di semua tahapan proyek. Hal ini berlaku untuk kedua lokasi tambang greenfield dan brownfield.

Manajemen praktik kerja unggulan hanya dapat dicapai melalui:

- karakterisasi yang cermat
- klasifikasi jenis-jenis bahan tambang
- perencanaan dan penjadwalan yang layak untuk pembendungan bahan AMD yang berisiko di sepanjang LoM.

Dalam konteks ini, 'bahan tambang' adalah semua bahan sulfida yang dapat terpapar air dan udara, baik secara langsung sebagai akibat dari yang digali dan terpapar atau tidak langsung sebagai akibat dari penarikan air tanah (desaturasi dari strata sulfida) sebagai konsekuensi dari pengeringan.

Saran ahli harus dicari pada tahap awal pengembangan proyek untuk membantu lokasi personil (terutama perencana tambang) menafsirkan hasil, menentukan jenis bahan geokimia dan memahami implikasi untuk operasi, manajemen material dan penutupan.

Tabel 3 merangkum komponen utama dari program karakterisasi bahan tambang untuk sebuah proyek baru. Ini memperlihatkan tahap dalam kehidupan tambang di mana berbagai jenis karakterisasi harus dimulai dan dikembangkan lebih lanjut, dan area umum tanggung jawab untuk menjalankan dan mengelola program karakterisasi. Sementara tabel ini diproduksi khusus untuk merangkum komponen karakterisasi geokimia dari pemodelan sumber daya G4 dan proses perencanaan tambang yang dilakukan oleh Kinross Gold Corporation di Amerika Serikat, isinya umum berlaku. Deskripsi dari berbagai metode pengujian disediakan di bawah di bagian ini.

Tabel 3: karakterisasi geokimia dan tahap dalam kehidupan tambang

DATA ATAU ANALISIS	PROSES AWAL	AWAL	URUKAN	PENENTUAN RUANG LINGKUP	PRA-KELAYAKAN	KELAYAKAN	OPERASI
Desain/ulasan strategi pengumpulan data (pemilihan metode analisis dan kerapatan dan distribusi sampling)	Expl						
Sulfur total and karbon	Expl						
Data multi-elemen	Expl						
Uji neraca asam basa (acid base account (ABA)), uji pembentuk asam bersih (net acid generation (NAG)), penarikan air	Expl / Env						
Penyelidikan kinetik	Env						
Identifikasi persyaratan pengelolaan bahan	Env / M- Planner						
Memantau & strategi pengumpulan data (frekuensi, distribusi, analisis sampling)	Env / M- Planner						

Expl = Exploration (Eksplorasi); Env = Environment (bagian lingkungan); M-Planner = mine planner (perencana tambang)

Secara progressive semakin rinci/lanjut

Implementasi penuh

Gunakan/pelihara/perbarui seperlunya

Sumber: Diproduksi kembali dengan izin, Kinross Gold Corporation, USA, dari Williams et al. (2015).

Penyelidikan tingkat pemeriksaan dasar harus dimulai sedini mungkin. Dalam contoh pertama, mengacu pada operasi pertambangan lain di wilayah ini, terutama yang mengeluarkan dari unit stratigrafi atau geologi yang sebanding, dapat memberikan informasi empiris tentang perilaku geokimia kemungkinan jenis bijih, batuan sisa dan batuan dinding, serta potensi produksi DAL. Logging bor inti secara geologi (atau chip drill) harus dilakukan untuk mengidentifikasi keberadaan mineral reaktif seperti sulfida dan karbonat, kelimpahan dan modus kejadian mereka.

40 Bagi banyak lokasi, indikasi dini potensi DAL dapat dari pengukuran kandungan sulfur total dan karbon total dalam bahan yang dikumpulkan. Penyaringan untuk sulfur total di lapangan dapat dilakukan dengan alat analisis X-ray fluorescence (XRF) genggam. Kebutuhan dan lingkup investigasi yang lebih rinci tergantung pada penemuan penyaringan awal ini.

Di mana penyaringan memperlihatkan bahwa penilaian lebih lanjut diperlukan, pendekatan praktik kerja unggulan adalah untuk mengumpulkan dan menguji sampel yang cukup untuk semakin mengembangkan model spasial statistik yang valid dari potensi limbah DAL, zona bijih dan bahan tambang lainnya yang relevan (seperti dijelaskan di atas) untuk mengukur sejauh mana potensi atau besarnya DAL. Model DAL spasial meliputi model blok (biasanya di tambang-tambang batuan keras) atau model grid/lapisan (biasanya dalam tambang-tambang batubara) yang dapat dikembangkan untuk mewakili bahan tambang di lokasi (misalnya, bijih pra-penambangan dan batuan sisa dan dinding batuan di lokasi) maupun bahan ex lokasi (seperti stok bijih dan WRD).²² Dalam buku pegangan ini, selanjutnya model blok dan model kisi/lapisan secara kolektif disebut model 'blok'.

Sebuah model blok DAL (Downing & Giroux 2014) adalah representasi seluler tiga dimensi tingkat risiko DAL disajikan oleh berbagai jenis bahan tambang. Ukuran masing-masing sel relatif terhadap heterogenitas lateral limbah (dan bijih) akan menentukan seberapa akurat model. Setiap sel diisi dengan sifat materi yang relevan. representasi visual penampang melalui model blok risiko DAL diperlihatkan pada Gambar 10. Hal ini memperlihatkan lokasi bahan dari berbagai jenis (warna yang berbeda) dalam konteks spasial dari kerang pit (pit shell) akhir.

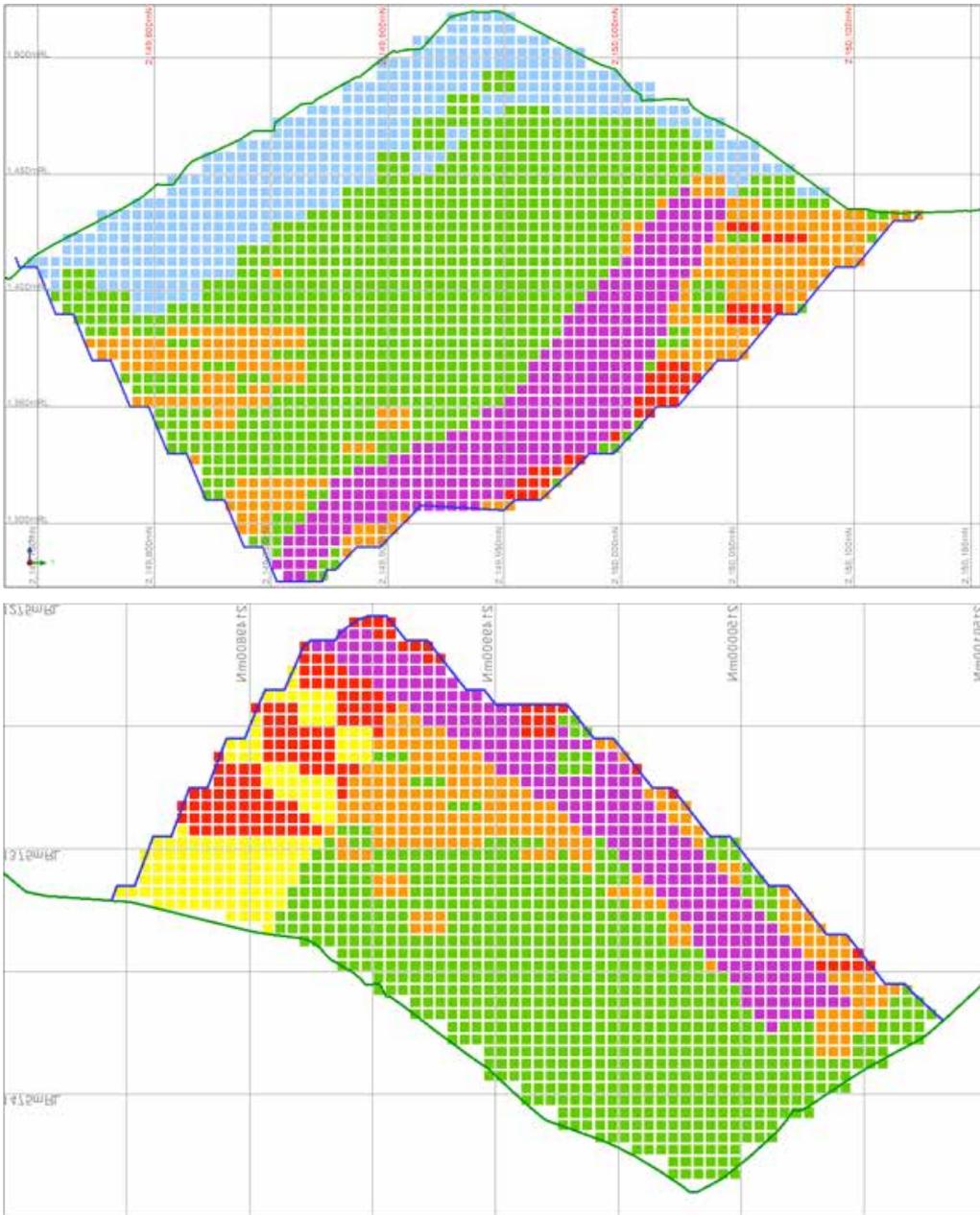
Bila memungkinkan, sebuah model blok DAL (atau lapisan geokimia lingkungan dalam model tambang) harus didasarkan pada model blok geologi tambang yang ada. Penerapan berbagai uji geokimia (misalnya, AMIRA 2002; Penelitian Coastech 1989; INAP 2009; MEND 2005; Miller et al 1997; Price 2009; Standar Australia AS4969.0-AS4969.14 untuk bahan tanah sulfat masam) akan diperlukan untuk mengembangkan dan lebih menyempurnakan sistem klasifikasi dan model blok DAL, sebagai definisi yang lebih besar dari sumber daya dan limbah yang terkait dan bahan sekitarnya yang diperoleh.

Perhatikan bahwa tidak ada pendekatan karakterisasi tunggal yang berlaku untuk semua jenis deposit mineral. Namun, setelah parameter dikalibrasi menggunakan berbagai uji geokimia, ada kemungkinan bahwa hanya satu atau dua parameter (seperti muatan sulfur atau data NAPP) yang akhirnya dapat digunakan untuk menyederhanakan masukan ke dalam model blok.

Hasil uji kerja karakterisasi harus digunakan untuk menghasilkan klasifikasi risiko lapisan DAL dalam model blok. Lapisan ini mengidentifikasi zona-zona limbah dan bahan di tempat yang menimbulkan risiko tertinggi dan karenanya memerlukan paling banyak pengelolaan saat ditambang (Gambar 10). Mengetahui sebelumnya volume material bermasalah, dan kapan akan diproduksi oleh jadwal pertambangan, akan memfasilitasi penempatan di lokasi yang paling tepat dan memastikan bahwa bahan berbahaya cukup tersedia untuk dienkapsulasi atau dilapisi penutup dalam jangka waktu yang wajar (misalnya, dalam jeda waktu sebelum pembentukan asam) setelah ditempatkan.

²² Untuk sederhanya, istilah 'model blok DAL' di sini dan selanjutnya digunakan dalam buku pegangan untuk mencakup semua model spasial DAL.

Gambar 10: Representasi visual model blok DAL—dua potong potongan lintang memperlihatkan hubungan jenis limbah untuk shell pit-terbuka (tubuh bijih berwarna ungu)



- PAF Oksida
- NAF tidak membentuk asam
- reaksi rendah PAF
- reaksi tinggi PAF
- Biji

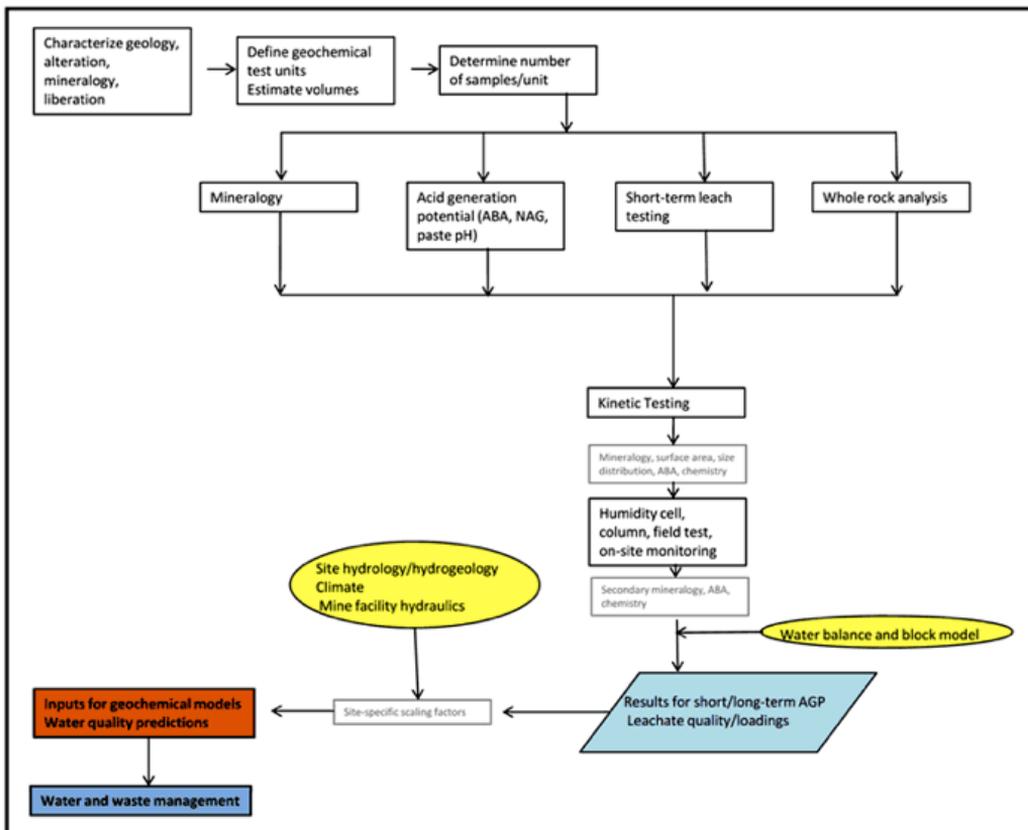
PAF = potentially acid-forming (berpotensi membentuk asam); NAF = non-acid-forming (tidak membentuk asam)

Setelah sistem klasifikasi risiko DAL dikembangkan, tingkat dan waktu pembentukan DAL dapat dinilai dengan menggabungkan model blok DAL dan jadwal produksi bahan tambang dengan hasil uji kerja geokimia kinetik untuk masing-masing bahan tambang utama dan satuan batuan yang relevan (Lihat di bawah).

Uji kerja kinetik melibatkan pengukuran tingkat reaksi bahan sulfidik, mengidentifikasi potensi larutan kontaminan yang dikhawatirkan dan tingkat pelepasannya, dan memperkirakan potensi jeda waktu sebelum timbulnya pembentukan asam dan pembentukan kemasaman dengan umur panjang yang diprediksikan. Uji kinetik termasuk metode-metode kolom resapan lindi, sel kelembaban dan dan konsumsi oksigen serta tumpukan uji lapangan.²³

Urutan uji geokimia dan arus informasi untuk menginformasikan perkembangan limbah dan air strategi pengelolaan air untuk lokasi tambang dirangkum dalam Gambar 11. Penggunaan model blok DAL berkembang dengan baik dan terkait dengan jadwal bahan tambang, didukung oleh data geokimia statis dan kinetik, menyediakan pendekatan yang kuat untuk memprediksi besarnya potensi dampak kualitas air yang terkait dengan DAL dan untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan tindakan-tindakan pengelolaan bahan sulfida.

Gambar 11: Lembar aliran (flowsheet) pelaksanaan program karakterisasi geokimia



Sumber: Diproduksi kembali dengan izin, Kinross Gold Corporation, USA, dari Williams et al. (2015)..

23 Penerapan data uji kinetik pada desain proyek tertentu atau strategi pengelolaan limbah yang diusulkan dibahas lebih lanjut di Bagian 4.5.

Data yang dihasilkan oleh pendekatan ini dapat dimasukkan ke dalam atau kualitas air lokasi atau domain di tingkat model yang lebih rumit untuk mengembangkan lebih rinci prediksi kimia air guna menilai dampak potensial. Namun, nilai pemodelan tersebut harus dinilai dalam hal sensitivitas dan ketidakpastian hasil yang dapat dicapai.

4.2 Sampling untuk karakterisasi

4.2.1 Ikhtisar

Memilih sampel dan metode yang digunakan untuk mengumpulkannya adalah tugas-tugas penting yang perlu pertimbangan dengan cermat pada semua tahap proyek. Sementara proyek berlangsung dari eksplorasi hingga kelayakan, berbagai sampel yang diuji pada akhirnya harus mewakili setiap jenis materi yang akan digali atau terpapar sepanjang LoM dan setelah penutupannya. Sampel yang cukup harus diperoleh untuk masing-masing jenis bahan yang terpapar untuk menentukan tingkat variabilitas yang signifikan dalam sifat material mereka. Jenis utama bahan tambang untuk sampel termasuk batuan sisa, overburden, bijih (ROM dan berkadar rendah) dan dinding batuan (terbuka/di bawah tanah). Sementara overburden mungkin tidak bermuatan banyak sulfida, masih dapat tetap diperkaya secara geokimia dalam logam dan memerlukan pengelolaan khusus.

Setiap jenis bahan tambang dapat terdiri dari beberapa satuan batuan yang berbeda. Selain itu, setiap litologi tertentu dapat lapuk atau dioksidasi untuk luasan yang berbeda dan, karenanya akan mempengaruhi reaktivitas dan potensi DAL, zona yang diubah juga perlu diambil sampelnya dan ditandai. Bahkan jika konsentrasi sulfida rendah atau tidak ada karena proses pelapukan, drainase metal mungkin masih menjadi masalah di beberapa timbunan. Ini menyoroti pentingnya melakukan sampling geokimia (dan karakterisasi) untuk semua jenis bahan.

Melakukan sampel yang representatif melibatkan mengidentifikasi jumlah dan jenis satuan batuan serta perubahan dan pelapukan sub-varian yang merupakan sebagian besar (>95%) dari total tonase material yang akan digali atau terpapar kondisi pengoksidasi. Bila memungkinkan, pengambilan sampel ini harus merentang sepenuhnya lateral dan vertikal dari cadangan bijih dan limbah yang berkaitan dan bahan sekitarnya. Penting untuk mencari saran ahli pada tahap awal pengembangan proyek guna memberikan masukan ke dalam desain program pengeboran eksplorasi dan pengambilan sampel terkait untuk karakterisasi geokimia.

Sampel perwakilan dari aliran proses/produk/konsentrat dan tailing atau proses limbah lain harus diperoleh dari uji kerja metalurgi yang dilakukan selama tahapan kelayakan dan pengembangan proyek. Sampel-sampel tersebut diperlukan selain sampel bijih, limbah dan bahan sekitarnya untuk memberikan informasi karakterisasi geokimia untuk tailing dan komponen produk dari sistem pengelolaan limbah DAL. konsentrasi sulfida mineral dapat sangat reaktif dan mungkin memerlukan pengelolaan tertentu di mana mereka ditimbun (lokasi, selama transportasi, atau dalam penyimpanan menengah di pelabuhan).

Jumlah dan jenis sampel yang dipilih akan spesifik-lokasi dan tergantung pada tahap proyek (lihat Tabel 2 untuk Pedoman tentang nomor sampel dengan tahapan proyek). Sampel yang cukup harus diperoleh untuk mewakili variabilitas/heterogenitas di setiap materi tambang seperti dijelaskan di atas. Faktor-faktor seperti kebiasaan, ukuran butir, cacat struktural, sejauh mana perubahan dan penyebaran atau urat mineral reaktif (misalnya, mineral sulfida, mineral karbonat) harus ditangani sebagai bagian dari proses seleksi sampel untuk memastikan bahwa berbagai sifat yang relevan ditangkap untuk setiap jenis bahan tambang.

Pengumpulan sampel dan penanganan persyaratan juga perlu memperhitungkan tingkat pelapukan (misalnya, segar, sebagian dioksidasi atau sepenuhnya teroksidasi) pada saat sampling, dan implikasi untuk hasil uji kerja geokimia statis atau kinetik berikutnya. Hal ini sangat penting untuk bahan inti bor tua, sampel lapuk dari brownfield atau warisan lokasi, dan bahan sulfidik yang sangat reaktif dan/atau rentan terhadap pembakaran spontan. Idealnya, sampel dari core drill harus diambil dan diuji sesegera mungkin setelah pengeboran. Jika tidak mungkin, inti bor harus disimpan di bawah penutup (misalnya, di gudang utama/core shed) untuk meminimalkan proses paparan pelapukan sampai sampling dan pengujian dapat terjadi. Chip bor harus disimpan dalam tas plastik sampel yang kuat (heavy duty) disumbat untuk meminimalkan potensi oksidasi sebelum pengujian.

4.2.2 Bahan tambang di tempat

Meskipun pengeboran dan pengambilan sampel cenderung berfokus pada zona bijih dalam eksplorasi, pra-kelayakan dan tahap kelayakan, sampel limbah potensial dan bahan batuan-dinding terpapar juga harus cukup dikumpulkan untuk mengkonfirmasi bahwa risiko masa depan DAL dari sumber-sumber tersebut tidak diremehkan secara substansial. Selagi proyek berkembang, sampel batuan sisa dan dinding batuan harus semakin diwakili. Perkembangan progresif ini memastikan agar data yang memadai tersedia untuk memproduksi model blok DAL yang kuat dan terkait dengan jadwal pengelolaan bahan tambang. Analisis geostatistik akhirnya akan dapat digunakan untuk menginformasikan dan mengoptimalkan strategi sampling dan untuk memperbaiki model blok.²⁴ Namun, dalam jumlah yang memadai sampel yang mewakili satuan batuan yang berbeda, dan distribusi lateral properti dalam mereka satuan batuan, awalnya harus tersedia sebelum analisis tersebut dapat diterapkan dengan tingkat kepercayaan yang memadai.

Pedoman sampling untuk uji geokimia statis dan kinetik untuk bahan di tempat awal (yaitu, belum ditambang) diringkaskan dalam Tabel 4. Frekuensi sampel indikatif tersedia pada Tabel 2.

Sampel yang dikumpulkan untuk penilaian DAL selama operasi biasanya diperoleh dari lubang yang dibor untuk peledakan atau pengembangan bawah tanah. Batas limbah dan bijih yang ditentukan ditandai dengan menggunakan model blok geologis pada peta rencana bangku saat ini untuk tambang terbuka (atau peta untuk pengembangan rencana dorongan dan lombong tambang bawah tanah) dan diperiksa sebelum dan sesudah peledakan. Hasil dari karakterisasi sampel ledakan lubang digunakan untuk mencocokkan model geologis dan model blok DAL.

²⁴ Lihat Studi Kasus 3.

Tabel 4: Pedoman sampling untuk bahan-bahan tambang di tempat

- Sampel meruah massa ganda, untuk uji kerja geokimia statis maupun kinetik, diperlukan untuk mewakili masing-masing litologi dan jenis pelapukan dari berbagai belahan deposit (yaitu, untuk memastikan perwakilan variasi lateral dan vertikal).
- Drillhole (lubang bor) sampling berkelanjutan harus diselesaikan di mana bermacam-macam sampel dikumpulkan untuk karakterisasi, terdiri dari litologi tunggal dan jenis pelapukan, daripada yang terentang lebih dari satu jenis.
- Lubang-lubang bor untuk pengambilan sampel harus dipilih berdasarkan kisi jarak genap dan, dalam kasus tambang logam, harus sampel dari permukaan (hanging wall/dinding penahan dengan posisi di atas) ke footwall (dinding penahan patahan dengan posisi di bawah) dari tubuh bijih. Batuan sisa, bijih dan batuan sekitarnya harus diambil sampelnya. Bijih berlian memberikan sumber terbaik untuk pengambilan sampel (karena bahan utuh dapat dilog secara visual), diikuti oleh sirkulasi terbalik (RC) chip bor.^a Sebuah rezim pengambilan sampel yang mirip harus digunakan untuk tambang batubara, meskipun bahan sulfidik sering terkonsentrasi dalam batubara di dekat dan di dalam tambang, sehingga intensitas sampling dapat tidak simetris terhadap area-area tersebut.
- Setiap sampel meruah harus diambil dari panjang interval drillhole (lubang bor) yang cukup untuk sampel litologi tunggal (biasanya 0,5 m sampai 10 m), kecuali pola diferensial dari perubahan menyatakan sebaliknya. Beberapa satuan batuan tidak boleh dicampur. Pada tambang-tambang batubara, penting untuk menyertakan sampel spesifik atap lapisan, lantai dan perpisahan utama batubara dalam berbagai sampel yang diambil dari dalam drillhole.
- Setiap sampel meruah harus terdiri dari paling sedikit seperempat inti (minimal) diekstrak dari seluruh panjang interval drillhole yang dipilih untuk memastikan bahwa sampel adalah sepenuhnya mewakili interval tersebut.
- Sampel untuk uji kerja geokimia umumnya tidak boleh digabung dalam setiap drillhole kecuali subsampel digunakan untuk menghasilkan gabungan (komposit) yang diperoleh dari litologi dan selang drillhole yang sama. Menggabung sampel (misalnya, jika ukuran sampel yang lebih besar diperlukan untuk uji kinetik) terkadang dapat dilakukan setelah hasil dari uji penyaringan geokimia awal telah diperoleh dan diinterpretasikan,
- Setiap sampel meruah harus dihancurkan hingga agregat <20 mm (atau lebih halus) untuk memfasilitasi perwakilan subsampling dengan 'membelah'. Subsampel perwakilan tidak dapat dicapai dengan sampel sesaat (grab) dari bahan massa kecil dari bahan massal (bagian terbesar). Memisahkan dengan menggunakan sarana standar (seperti splitter rotary atau splitter riffle) dan prosedur menghasilkan subsampel perwakilan massa yang diperlukan untuk analisis geokimia statis dan/atau kinetik.
- Untuk uji kerja geokimia statis, perwakilan subsampel meruah massa minimal 1 kg agregat umumnya cukup untuk dikirimkan ke laboratorium. Persiapan sampel tambahan oleh laboratorium meliputi penghancuran lebih lanjut hingga <2 mm atau <4 mm, riffle splitting dan pulverising untuk <100 m, dan pulp yang dihasilkan di subsampel untuk analisis.
- Jumlah sampel meruah diperlukan untuk uji kerja kinetik (Bagian 4.5). Sampel dapat sekitar 2-5 kg untuk pekerjaan pengujian konsumsi oksigen, hingga 35 kg untuk uji kerja kolom resapan lindi, dan hingga 100 kg untuk uji kerja penyebaran oksigen.

^a Dalam kebanyakan cadangan logam, pengeboran RC atau ledakan udara rotari lubang terbuka (open-hole rotary air blast (RAB)) biasanya digunakan untuk mengebor melalui bahan batuan sisa, pengeboran coring menggunakan diamond drill bit untuk sampel bahan bijih. Dengan demikian, sebagian besar peralatan tambang tersedia untuk pengambilan sampel dan pengujian untuk properti limbah mungkin chip bor RC atau RAB, dengan bijih berlian terbatas tersedia untuk limbah pengujian.

- Untuk uji kerja geokimia kinetik, idealnya sampel harus disiapkan dan diuji dengan cara yang paling dekat mensimulasikan kondisi lapangan. Namun, untuk uji laboratorium berbasis ukuran sampel yang lebih kecil berarti batuan sisa perlu dihancurkan untuk memastikan luas permukaan partikel dan waktu persinggungan yang cukup dengan solusi pelindian (biasanya air yang diionkan atau lokasi air hujan). Sampel meruah biasanya dihancurkan untuk lulus ukuran teratas mulai dari 5 mm hingga 40 mm, tergantung pada dimensi apparatus pelindian. Tailing harus diuji pada ukuran gilingan yang akan digunakan untuk proses tersebut.
- Subsampel perwakilan bahan yang digunakan untuk uji kerja kinetik geokimia (bukan sebanding sejenis/bahan tambang) harus dikumpulkan untuk uji kerja geokimia statis untuk membantu dalam interpretasi temuan.

4.2.3 Bahan-bahan tambang terpapar yang ada

Bahan tambang terpapar yang ada biasanya ditemukan di brownfield dan warisan lokasi di mana bahan ditambang dan tailing proses telah terpapar selama beberapa waktu dan sebagian telah mengalami oksidasi yang signifikan. Namun, situasi ini juga dapat terjadi pada lokasi yang telah memiliki masa operasi yang panjang dan memiliki timbunan limbah, mungkin komposisi tidak pasti, di mana oksidasi sulfida sudah parah.

Untuk lokasi warisan, khususnya, mungkin ada sedikit atau tidak ada karakterisasi data sebelumnya yang akan memberikan informasi tentang komposisi primer dan disposisi dari jenis limbah yang berbeda dalam fasilitas pengelolaan limbah. Bahkan jika informasi sebelumnya tersebut tersedia, sejauh mana reaksi yang terjadi mungkin berarti bahwa karakteristik geokimia asli dari bahan telah berubah sedemikian rupa sehingga data karakterisasi asli tidak lagi berlaku. Istilah 'geokimia forensik' telah diterapkan pada proses yang harus diikuti untuk menentukan karakteristik berjalan (current) fasilitas tersebut.

WRD, khususnya, dapat sangat heterogen (baik dalam geokimia dan distribusi ukuran partikel), tergantung pada bagaimana deposisi penambangan dan limbah dilakukan. Satuan batuan mungkin tidak lagi terdapat dalam pengaturan tata ruang yang ditetapkan dan di lapisan-lapisan yang masih utuh, seperti halnya bahan yang masih akan ditambang.

Sampling dari massa tersebut membutuhkan pendefinisian distribusi jenis bahan dan karakteristik geokimianya saat itu dengan mendapatkan jumlah yang cukup dari sampel profil, biasanya dengan memperoleh komposit selama interval vertikal 1 m. Ada yang sangat mirip antara apa yang diperlukan untuk menentukan varian spasial sifat geokimia pada fasilitas ini dan penilaian lokasi yang terkontaminasi. Oleh karena itu, rujukan harus dilakukan untuk Tindakan Perlindungan Lingkungan Nasional (National Environment Protection Measure (NEPM)) guna penilaian lokasi yang terkontaminasi untuk memberikan pedoman pada prinsip-prinsip desain pengambilan sampel.²⁵

Dalam kasus batuan sisa, sampel diperoleh dengan pengeboran atau pit uji (test pitting). Pengeboran konvensional, auger atau sonik digunakan untuk tailing. Kerumitan lain adalah ukuran partikel perlu ditangani sebagai bagian dari rezim sampling untuk batuan sisa yang ditambang. Fraksi <2 cm biasanya dianggap memberikan indikasi dini terbaik dari sifat sebagian besar bahan untuk karakterisasi awal. Namun, seluruh sampel selanjutnya dapat diperlukan untuk memberikan definisi yang lebih besar dari sifat fisik dan bahan DAL sebagai fungsi dari ukuran partikel.

Karakterisasi geokimia dari bahan yang sudah terpapar (misalnya, WRD yang sudah ada) biasanya berlangsung secara bertahap. Tahap pertama adalah penyelidikan skala pilot untuk mendapatkan ukuran kemungkinan varian

²⁵ <http://www.scew.gov.au/nepms/assessment-site-contamination>.

dalam properti. Tahap kedua melibatkan pengambilan sampel tambahan untuk lebih jelas mendefinisikan distribusi sifat material.

Massa sampel yang dibutuhkan dan jenis persiapan sampel yang diperlukan untuk uji kerja statis dan geokimia pada bahan-bahan yang sudah terpapar ini persis sama dengan bahan yang disediakan di tempat dalam Tabel 4.

4.3 Uji geokimia statis

Sebuah paket inti prosedur standar telah dikembangkan untuk menilai potensi pembentukan DAL dari bahan sulfida. Secara umum, prosedur yang dirancang untuk memperhitungkan keduanya:

- reaksi-reaksi penghasil-asam yang dikeluarkan oleh oksidasi mineral sulfida setelah terpapar oksigen atmosfer
- reaksi-reaksi penetral-asam yang dihasilkan dari disolusi mineral-mineral alkalin reaktif, terutama karbonat (Bagian 2).

Jenis metode uji geokimia statis dan kekuatan dan kelemahannya dijelaskan di bawah. Akhirnya, penjelasan penggunaan data uji statis untuk mengembangkan skema klasifikasi AMD untuk berbagai bahan tambang dinilai.

4.3.1 Pengukuran lapangan

Pengukuran sederhana dan sangat berguna untuk dilakukan di lapangan adalah pH dan EC: pH memberikan indikasi jumlah asam bebas, dan EC adalah konduktivitas listrik dari sampel. Kedua parameter dapat dengan mudah diukur di lapangan menggunakan pH yang dikalibrasi dan probe EC digabungkan ke meter genggam. Cairan-padat bubuk/slurry 1:1, 2:1 atau 5:1 dari sampel (biasanya <2 mm fraksi ukuran disaring dari sampel meruah dibuat dengan deionisasi air dan pH dan nilai EC diukur setelah jangka waktu tertentu. Cairan yang sama: rasio ekstraksi padat harus digunakan untuk semua sampel guna memberikan dasar umum untuk perbandingan antara sampel.

Nilai pH memperlihatkan apakah oksidasi sulfida telah menghabiskan kapasitas penetral bahan (pH asam), dan nilai EC memberikan ukuran jumlah garam terlarut (salinitas) tersedia untuk kerapatan materi. Pengukuran ini terutama berguna untuk mencirikan status bahan yang sebagian sudah teroksidasi (misalnya, bahan sulfida terpapar di permukaan, terdapat di fasilitas penyimpanan limbah yang ada, atau terdapat di cakrawala tanah sulfat masam).

Penilaian mineralogi berbasis lapangan (Bagian 4.3.2), uji NAG (Bagian 4.3.5) dan analisis XRF genggam juga dapat diterapkan untuk menyaring dan memandu pemilihan sampel untuk selanjutnya karakterisasi yang lebih ketat dengan menggunakan perangkat metode yang dijelaskan di bawah.

4.3.2 Analisis mineralogi

Analisis mineralogi paling sering menggunakan teknik XRD (difraksi X-ray) yang dilakukan pada 1–2 mg bahan sub-sampel tumbuk halus secara representatif. Batas deteksi untuk jenis mineral yang diberikan secara rutin mendekati 1-2% berat (yaitu, 10.000-20.000 mg/kg) untuk tahap- tahap mineral umum. Oleh karena itu, sementara penilaian mineralogi akurat adalah tujuan akhir dari uji kerja geokimia, teknik XRD hampir selalu perlu dilengkapi dengan metode yang lebih peka yang menyimpulkan daripada langsung mengukur konsentrasi mineral tertentu.

Untuk lokasi greenfield, mineral reaktif utama biasanya didominasi oleh sulfida dan mineral karbonat. Karena tidak semua mineral sulfida menghasilkan kemasaman dan tidak semua mineral karbonat dapat secara efektif menetralkan kemasaman, penting untuk memahami karakteristik dan distribusi mineral utama seperti yang diungkapkan oleh XRD.

Sebagai bahan geologi reaktif mengoksidasi, jumlah tahap mineral sekunder meningkat, dan dapat melapisi permukaan mineral sulfida primer, sehingga menurunkan tingkat reaksi dari sebagian besar kumpulan mineral dengan oksigen. Beberapa tahap mineral sekunder kelarutan rendah (misalnya, alunit dan jarosit) dan dapat menyimpan kemasaman. Evolusi alami ini memiliki implikasi yang signifikan untuk pengukuran maupun pengelolaan risiko DAL di brownfield atau warisan lokasi, dan menyoroti kebutuhan untuk jelas memahami sifat dan distribusi dari tahap mineral menghasilkan kemasaman sekunder, terutama di lokasi-lokasi di mana telah terjadi oksidasi yang signifikan dari mineral sulfida.

Kapasitas pembentuk DAL dan penetral DAL dari mineral-mineral umum sulfida dan karbonat dari data mineralogi yang dikumpulkan melalui logaritma geologi atau analisis XRD dapat dihitung dengan menggunakan shareware ABATES (Waters et al 2014; Lihat Daftar Istilah).

Analisis mineralogi dapat dilakukan melalui metode berbasis lapangan atau laboratorium. Metode lapangan menggunakan estimasi visual kelimpahan mineral (%volume) diperoleh dari geologi logging bor inti, didokumentasikan dalam log bor, dan/atau diperoleh dari observasi lapangan. Keuntungannya adalah data geologi umumnya tersedia pada setiap tahap pengembangan tambang, memungkinkan estimasi first-pass (bebas cacat) cepat potensi DAL untuk bahan maupun batuan sisa in situ (di tempat).

Teknologi baru yang tersedia untuk pengukuran berbasis lapangan analitis kelimpahan mineral (%berat) menggunakan peralatan XRD benchtop. Analisis XRD laboratorium dapat mencapai akurasi yang lebih tepat dan menurunkan batas deteksi daripada pengukuran berbasis lapangan, tapi tetap makan waktu dan terbatas dalam resolusi.

Data mineralogi paling efektif digunakan dalam hubungannya dengan hasil dari metode uji geokimia lainnya (lihat di bawah).

4.3.3 Komposisi elemental

Komposisi elemental sampel perwakilan dari setiap bahan tambang harus ditentukan dan dinilai dalam kaitannya dengan tingkat pengayaan atau penipisan relatif terhadap tanah latar belakang dan batu. Dua metode dapat digunakan untuk melakukan hal ini: faktor unsur pengayaan (EEF) dan indeks geokimia kelimpahan (GAI). Kedua langkah dapat digunakan sebagai bagian dari program latihan karakterisasi praktik kerja unggulan karena memberikan informasi yang saling melengkapi.

EEF membandingkan konsentrasi dalam sampel dengan latar belakang untuk daerah setempat, sementara GAI membandingkan konsentrasi dengan data elemen tanah/batuan kelimpahan global median, menggunakan pendekatan geostatistik berdasarkan skala logaritma. Perbandingan ini digunakan untuk mengidentifikasi elemen (terutama logam dan metaloid) yang terjadi pada konsentrasi di atas nilai-nilai latar belakang normal dan yang mungkin membutuhkan penyelidikan lebih lanjut, misalnya dengan analisis ekstrak air dan/atau uji supernatan NAG (Bagian 4.3.5) atau dengan uji kerja kinetik (Bagian 4.5), untuk lebih menilai signifikansi lingkungan potensial mereka.

Penggunaan hanya GAI sendiri dapat memberikan indikator over-konservatif pentingnya suatu kejadian dari nilai GAI yang dinaikkan jika nilai latar belakang lokal untuk elemen tertentu tinggi dibandingkan dengan rata-rata global. Walaupun demikian, bahkan jika latar belakang lokal untuk elemen tertentu dinaikkan, tidak berarti bahwa pentingnya kejadian tersebut dapat diabaikan. Misalnya, paparan dari unsur yang terkandung dalam bahan yang ditambang dapat menghasilkan muatan tambahan dari elemen ke lingkungan melalui pelindian yang dipercepat yang disebabkan oleh oksidasi sulfida.

Data komposisi elemental juga dapat membantu dengan interpretasi data mineralogi, karena lebih presisi dan deteksi yang lebih rendah atas batas metode analisis yang digunakan untuk mengukur konsentrasi unsur, seperti XRF, ICPAES (induktif ditambah plasma atom spektroskopi emisi) genggam serta skala laboratorium dan secara induktif ditambah plasma spektrometri massa.

Beberapa elemen, seperti arsenik, merkuri, selenium dan kadmium, mungkin menjadi perhatian pada konsentrasi yang relatif tidak substansial meningkat terhadap konsentrasi latar belakang, karena elemen-elemen dapat biomagnify (senyawa menumpuk) melalui rantai makanan. Oleh karena itu penting bahwa pelindian dan/atau bioavailability (ketersediaan hayati) elemen ini dipertimbangkan lebih lanjut, jika diperlukan, sebagai bagian dari penilaian. Konsentrasi mereka dalam air atau ekstrak pH yang dikendalikan dapat dibandingkan dengan proteksi ekosistem perairan yang dapat diterapkan dan pedoman air minum ternak dalam ANZECC-ARMCANZ (2000a). Dalam beberapa kasus, nilai konsentrasi logam/metaloid dalam padatan dapat dibandingkan dengan nilai konsentrasi logam dalam tanah dalam pedoman Australia untuk penilaian lokasi yang terkontaminasi (SCEW 2013). Pedoman yang terakhir baru-baru ini diperbarui dan sekarang berisi pedoman yang diperluas tentang bagaimana melakukan penilaian risiko yang mencakup akuntansi untuk bioavailability logam dalam tanah yang terkontaminasi oleh limbah pertambangan atau DAL.

4.3.4 Neraca asam basa

Neraca asam basa (ABA) mengestimasi keseimbangan antara potensi bahan untuk menghasilkan asam dan untuk menetralkan asam. Output dari ABA adalah nilai yang dikenal sebagai asam penghasil potensi bersih (net acid producing potential (NAPP)), dinyatakan dalam satuan kilogram asam sulfat per ton ($\text{kg H}_2\text{SO}_4/\text{t}$).

Uji NAPP melibatkan menentukan potensi kemasaman maksimal (maximum potential acidity/MPA) dan kapasitas maksimal penetralan asam yang melekat (acid-neutralising capacity/ANC) dari sampel. Muatan total sulfur umumnya digunakan sebagai estimasi konservatif dari sulfur pirit (yaitu, semua S diasumsikan untuk hadir dalam bentuk pirit) untuk menghitung MPA ($\text{MPA} = \% \text{ berat S} \times 30,6$). Penggunaan sulfur total adalah pendekatan konservatif karena beberapa sulfur mungkin terdapat dalam bentuk lain selain pirit.

Beberapa mineral sekunder yang mengandung sulfur-sulfat seperti gipsum, anhidrit dan barit yang hukan penghasil asam, sementara yang lain seperti melanterit, jarosit dan alunite adalah penghasil asam, meskipun pada tingkat yang lebih rendah dari pirit. Kelompok yang terakhir dari mineral asam sulfat (sekunder) adalah produk dari oksidasi pirit. Ada sulfida logam lainnya, seperti kalkosit (Cu_2S) dan kovelit (CU), yang menghasilkan kurang kemasaman pada oksidasi dari pirit, dan lain-lain yang tidak menghasilkan asam, seperti sfalerit (ZnS) dan galena (PbS). Freeware ABATES (lihat Glosarium) menyumbang potensi yang menghasilkan asam yang berbeda dari berbagai jenis mineral sulfida yang mungkin ada.

Jenis mineral (primer dan sekunder) yang ada dan konsentrasinya dapat diidentifikasi atau disimpulkan dengan kombinasi XRD mineralogi dan uji kerja spesiasi sulfur (bagian 4.3.2 dan 4.3.6). Jika jumlah bentuk lain dari sulfida ini terdapat dalam sampel ditentukan, kemudian dapat dibuat penyesuaian untuk kontribusi mereka guna memberikan estimasi yang lebih rinci dari MPA.

ANC biasanya ditentukan dengan penambahan kuantitas yang dikenal sebagai asam klorida pekat ke sampel, diikuti oleh titrasi balik dengan natrium hidroksida untuk menghitung jumlah maksimum asam yang dikonsumsi oleh kapasitas penetral inheren bahan. Lihat Price (2009) untuk pembahasan tentang metode yang berbeda yang dapat digunakan untuk mengukur ANC suatu sampel.

Penentuan ANC kurang akurat dan mungkin melebihi-lebihkan ANC yang tersedia untuk menetralkan DAL. Sementara pengukuran total karbon karbonat berguna dalam konteks ini, perlu sangat berhati-hati dengan parameter ini. Secara khusus, kecuali dicatat adanya karbonat zat besi dan kandungan mangan seperti siderit, ankerite, dolomit Ferusan dan rodokrosit, kapasitas penetral berbasis karbonat akan berlebihan. Masalah ini umumnya dapat diselesaikan melalui kombinasi uji kerja mineralogi (Bagian 4.3.2) dan uji kerja analisis unsur (Bagian 4.3.3).

Estimasi yang lebih disempurnakan dari sampel efektif ANC dapat disediakan oleh metode kurva karakteristik asam penyangga (buffer). Sampel secara perlahan dititrasi dengan asam encer untuk mengukur sejauh mana buffer disediakan oleh mineral karbonat. Namun, harus berhati-hati untuk menangani bahan-bahan yang bermuatan sejumlah besar siderit (FeCO_3) atau rodokrosit (MnCO_3), yang merupakan mineral karbonat yang tidak memberikan kapasitas penetral asam bersih.

Setelah data karakterisasi yang cukup tersedia untuk deposit tertentu, mungkin dapat ditemukan, misalnya, bahwa ada korelasi yang baik antara ANC efektif dan jumlah Mg dan Ca masam yang dapat diekstraksi. Dalam kasus seperti itu, umumnya nilai $\text{Ca} + \text{Mg}$ lebih sering ditentukan untuk dapat digunakan untuk pengisi penyiaran ANC dalam model blok.

Dua ukuran ABA dihitung dari MPA dan ANC: rasio NAPP dan ANC/MPA. NAPP adalah ukuran kualitatif dari perbedaan antara kapasitas sampel untuk menghasilkan asam (MPA) dan kapasitasnya untuk menetralkan asam (ANC).²⁶ NAPP, MPA dan ANC yang dinyatakan dalam satuan $\text{kg H}_2\text{SO}_4/\text{t}$ dan NAPP dihitung sebagai berikut:²⁷

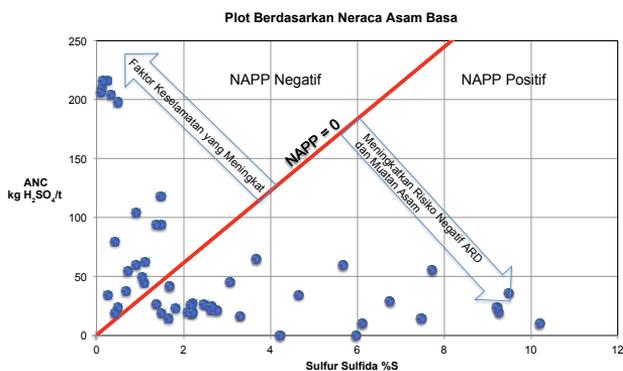
$$\text{NAPP} = \text{MPA} - \text{ANC}$$

Jika MPA kurang dari ANC, maka NAPP negatif, mengindikasikan bahwa sampel mungkin memiliki cukup ANC untuk mencegah asam. Sebaliknya, jika MPA melebihi ANC, maka NAPP positif, mengindikasikan bahwa materi mungkin pembentuk asam.

Rasio ANC/MPA memberikan indikasi margin relatif atau faktor keamanan (atau ketiadaan) untuk bahan tertentu. Berbagai nilai ANC/MPA direferensikan dalam literatur untuk memperlihatkan nilai-nilai yang aman untuk pencegahan asam. Nilai-nilai tersebut biasanya berkisar dari 1,5 hingga 3. Sebagai aturan umum, rasio ANC/MPA dari 2 atau lebih menandakan ada kemungkinan besar bahwa materi akan tetap mendekati netral pH dan tidak bermasalah dalam hal pembentukan kemasaman dan resultan drainase asam. Namun, NMD dan SD mungkin masih merupakan masalah yang perlu ditangani.

Hubungan antara ANC dan konten sulfida untuk rentang sampel diperoleh dengan program karakterisasi AMD ditampilkan pada plot berdasarkan neraca asam basa (Gambar 12). Plot memperlihatkan distribusi sampel antara domain risiko yang lebih tinggi dan lebih rendah (menghasilkan pH asam bersih).

Gambar 12: Contoh plot berdasarkan neraca asam basa



Catatan: ARD identik dengan AMD untuk bahan-bahan tersebut.

26 Ada beberapa variasi nomenklatur untuk parameter uji statis dalam literatur. Misalnya, potensi netralisasi bersih (NNP) mengacu pada perbedaan antara potensi netralisasi (NP) dan potensi asam (AP). NNP umumnya dinyatakan sebagai $\text{kg CaCO}_3/\text{t}$.

27 NAPP juga dapat diperkirakan menggunakan shareware ABATES (lihat Glossarium).

Pada Gambar 12, sampel didistribusikan selama domain positif dan negatif NAPP. Apakah terdapat bahan negatif NAPP yang cukup untuk mengimbangi bahan positif NAPP tergantung pada keseluruhan massa, reaktivitas, mineralogi dan penjadwalan kadar masing-masing bahan yang ada. Informasi ini dapat diberikan oleh data karakterisasi geokimia dan mineralogi dan data perencanaan tambang model blok DAL.

Jika sebagian besar sampel yang diwakili dalam Gambar 12 telah berada dalam domain risiko yang lebih tinggi, akan diperlihatkan:

- risiko tinggi hasil asam bersih
- bahwa ada kemungkinan bahan penetral bersih yang tersedia untuk mengenkapsulasi materi yang cenderung menghasilkan asam akan terbatas.

Karena beberapa mineral sulfur tidak menghasilkan asam (tapi mungkin berkontribusi NMD dan SD, seperti yang diperlihatkan di atas) dan terdapat bentuk dan reaktivitas pembentuk DAL dan mineral penetral DAL yang berbeda, ada tingkat ketidakpastian yang melekat dalam prediksi yang hanya didasarkan pada ketergantungan pada ABA yang dilaporkan.

Sementara nilai NAPP (dan rasio ANC/MPA) memberikan indikasi potensi pembentukan asam dari sampel, uji kerja tambahan diperlukan untuk memprediksi potensi NMD atau SD dan jeda waktu sebelum DAL substansial dihasilkan (lihat di bawah).

4.3.5 Uji pembentuk asam bersih (Net acid generation/NAG)

Uji pembentuk asam bersih (NAG), setelah dikalibrasi, merupakan salah satu metode yang paling sederhana dan umumnya metode uji geokimia yang paling dapat diandalkan untuk estimasi potensi first-pass (bebas cacat) DAL. Ini melibatkan reaksi sampel dengan hidrogen peroksida (H_2O_2) untuk secara cepat mengoksidasi setiap mineral sulfida (AMIRA 2002). Reaksi pembentuk asam maupun penetral asam terjadi secara bersamaan, dan hasil bersih merupakan ukuran langsung dari jumlah asam yang dilepaskan dari sampel. Sebuah pH setelah reaksi (NAG pH) kurang dari 4,5 umumnya memperlihatkan bahwa sampel adalah pembentuk asam bersih. Jumlah asam yang dilepaskan ditentukan oleh titrasi dengan nilai-nilai pH 4,5 dan 7,0 dan dinyatakan dalam satuan $kg H_2SO_4/ton$.

Uji NAG umumnya dilakukan di laboratorium, tetapi juga dapat digunakan di lapangan untuk memfasilitasi karakterisasi dan penanganan bahan sehari-hari. Suatu metode yang mirip telah dikembangkan untuk mengkarakterisasi dan menangani tanah asam sulfat (Ahern et al. 2014).

Beberapa variasi uji NAG telah dikembangkan untuk mengakomodasikan variabilitas geokimia jenis bahan tambang dan untuk mengatasi potensi gangguan. Dua prosedur uji statis utama NAG yang saat ini digunakan adalah tambahan uji NAG tunggal dan uji NAG sekuensial (AMIRA 2002). Uji NAG sekuensial mungkin diperlukan untuk sampel sulfida/sulfur tinggi untuk menyediakan ukuran dari total kapasitas pembentuk asam, dan untuk sampel dengan sulfur total yang tinggi dan ANC tinggi.

Analisis supernatan yang dihasilkan dengan prosedur NAG dapat memberikan informasi berharga tentang konsentrasi relatif dari logam yang mungkin terkandung dalam lindi yang dihasilkan oleh oksidasi sulfida yang ada dalam limbah. Secara khusus, uji NAG sekuensial dapat menginformasikan urutan pelepasan logam sebagai sulfida secara progresif teroksidasi.

PH dan komposisi supernatan NAG juga dapat digunakan untuk menyimpulkan apakah materi yang diuji dapat berisiko menghasilkan NMD atau SD.

Uji NAG tepat untuk berbagai bahan tambang, tapi tidak dapat diandalkan untuk sampel dengan muatan karbon organik tinggi seperti bahan yang mengandung batubara atau serpih bitumen terkait dengan beberapa deposito logam dasar. Modifikasi uji NAG yang tersedia untuk jenis-jenis bahan, tetapi hasilnya harus ditafsirkan dengan hati-hati (ACARP 2008).

Ada potensi untuk uji NAG untuk menghasilkan terlalu tinggi estimasi laju oksidasi relatif terhadap kondisi lapangan (Stewart et al. 2003). Oleh karena itu uji NAG paling berguna bila digunakan dalam kombinasi dengan metode uji geokimia statis dan kinetik lainnya.

4.3.6 Sulfur dan spesifikasi karbon

Uji kerja spesiasi sulfur dapat dilakukan untuk mengatasi beberapa keterbatasan uji kerja ABA, seperti potensi estimasi lebih tinggi untuk potensi asam jika sampel bermuatan bentuk-bentuk sulfur selain pirit, seperti yang sering terjadi pada mineral sulfat (misalnya, anhidrit, gipsum, barit, jarosit, alunite, schwertmannite), sulfur asli, non-pembentuk asam sulfida (misalnya, sfalerit, galena, kovelit) atau asam lemah yang menghasilkan senyawa yang mengandung belerang organik. Alasan untuk estimasi yang terlalu tinggi ini adalah bahwa perhitungan tahap pertama dari kapasitas sampel pembentuk kemasaman konservatif mengasumsikan bahwa semua sulfur yang terdapat dalam sampel dalam bentuk pirit, yang akan menghasilkan hasil maksimum kemasaman.

Uji kerja spesiasi sulfur semakin diterapkan pada penilaian potensi DAL, karena sangat berguna untuk:

- deposit yang sangat lapuk (yaitu yang teroksidasi)
- lokasi-lokasi brownfied dengan yang sebagian sudah tua atau bermuatan deposit batuan sisa dan tailing yang telah teroksidasi sejumlah besar jarosit dan mineral penyimpan asam sekunder
- mineralisasi yang bermuatan sulfida reaktif tinggi (misalnya, deposit pasir mineral).

Uji kerja spesiasi sulfur dapat digunakan untuk membedakan berbagai bentuk sulfur:

- Sulfur total (S_{Total});
- chromium reducible sulfur atau sulfida sulfur (S_{Cr}) (mineral sulfida) (Australian Standards 2008)
- sulfur sulfat yang terserap and larut dalam air (S_{KCl}) (misalnya, gipsum, melanterit— $FeSO_4$)
- asam atau sulfur sulfat dapat larut karbon dapat diekstraksi (carbonate extractable soluble sulfate) (S_{HCl}) (misalnya, gipsum, melanterit, jarosit, alunite)
- sulfur asli.

Uji kerja karbon spesiasi—termasuk jumlah karbon, karbon inorganik dan organik—dapat digunakan untuk melengkapi pengukuran ANC (digunakan dalam perhitungan NAPP) dan dalam beberapa kasus memberikan alternatif hemat biaya lebih handal bagi data ANC standar untuk pengembangan model blok.

4.3.7 Klasifikasi sampel

Tujuan utama metode pengujian geokimia statis yang dijelaskan di atas untuk menghasilkan skema klasifikasi sampel guna mendukung pengembangan model blok yang memperlihatkan distribusi risiko DAL melalui limbah, bijih dan bahan sekitarnya.

Pada tingkat yang paling mendasar, bahan dapat diklasifikasikan sebagai berpotensi membentuk asam (PAF), non-pembentuk asam (NAF) atau tidak pasti menggunakan temuan dari uji statis. Namun, penerapan hanya skema klasifikasi ini saja dapat mengakibatkan kegagalan untuk mengidentifikasi bahan berisiko memproduksi NMD dan/atau SD dan mengurangi kesempatan untuk manajemen yang lebih efisien dan hemat biaya bahan ditambang.

Seperangkat kriteria jenis/tipe diwakili oleh kompilasi pada Tabel 5 telah sering, dan terus berlanjut, digunakan untuk kategorisasi awal data uji statis yang diproduksi pada awal proses penilaian AMD.

Penggunaan hasil uji kedua NAPP dan NAG hasil uji mengurangi risiko kesalahan klasifikasi dengan menggunakan hanya data NAPP (lihat di bawah dan Gambar 13). Sebuah klasifikasi 'tidak pasti' digunakan saat terdapat konflik nyata antara hasil NAPP dan NAG (misalnya, saat NAPP positif dan NAG pH > 4,5, atau saat NAPP negatif dan NAG pH < 4,5).

Tabel 5: Kriteria penyaringan awal berdasarkan data uji NAPP dan NAG

JENIS BAHAN GEOKIMIA PRIMER	NAPP (KG H ₂ SO ₄ /T)	PH NAG
Kemungkinan membentuk asam (PAF)	> 10 ^a	<4,5
Kemungkinan membentuk asam—kapasitas rendah (PAF-LC)	0 hingga 10 ^a	< 4,5
Tidak membentuk asam (NAF)	Negatif	≥ 4,5
Penetral asam (ACM)	kurang dari -100	≥ 4,5
Tidak pasti (UC) ^b	Positif	≥ 4,5
	Negatif	<4,5

^a Spesifik lokasi tapi biasanya berkisar 5–20 kg H₂SO₄/t.

^b Diperlukan pengujian lebih lanjut untuk mengkonfirmasi klasifikasi bahan .

Sumber: Berdasarkan AMIRA (2002).

Kategori 'tidak pasti' merupakan salah satu yang sangat penting yang harus diselesaikan dengan uji kerja yang lebih luas. Jika proporsi yang besar dari bahan yang diuji jatuh ke dalam kategori yang tidak pasti, sangat penting bahwa program pengujian kinetik dimulai sesegera mungkin.

Keterbatasan skema klasifikasi pada Tabel 5 adalah tidak adanya pengakuan potensi material, terutama dalam kategori NAF, ACM dan UC, untuk menghasilkan NMD atau SD. Tambahan tingkat klasifikasi ini harus dilakukan sebagai bagian dari program latihan karakterisasi praktik kerja unggulan (termasuk uji kinetik) untuk menentukan seberapa tingkat risiko DAL yang ditimbulkan oleh bahan yang ditambang. Kegagalan untuk melakukan hal ini dapat mengakibatkan kesalahan klasifikasi sebagai bahan 'jinak' yang salah dikelola atau digunakan secara tidak tepat untuk tujuan pembangunan atau rehabilitasi.

Praktik kerja unggulan mengharuskan pembagian lebih lanjut berdasarkan kebutuhan spesifik yang diterapkan untuk mengidentifikasi sampel dengan kapasitas yang bervariasi pembentuk asam, kapasitas penetralisir asam dan NMD atau potensial SD sehingga profil risiko bahan dapat diidentifikasi dan dikelola dengan tepat. Misalnya, skema klasifikasi risiko geokimia seperti yang diperlihatkan pada Tabel 6 memungkinkan identifikasi permasalahan potensial yang lebih luas, meskipun mungkin tidak semua subkategori dalam kolom 4 diperlukan. Untuk lokasi tertentu, yang sub-klasifikasi dalam kolom 3 dan 4 biasanya dapat dikelompokkan menjadi tiga atau empat kelompok utama untuk pengelolaan yang lebih efisien dan hemat biaya dari spektrum jenis DAL.

Beberapa operator tambang menggunakan software proprietary (kepemilikan perangkat lunak) untuk mengotomatisasi proses klasifikasi guna memberikan klasifikasi bahan tambang, yang tidak bias, konservatif dan amat konsisten. Parameter yang biasa digunakan dalam sistem klasifikasi DAL diproduksi oleh metode uji statis yang dijelaskan di atas.

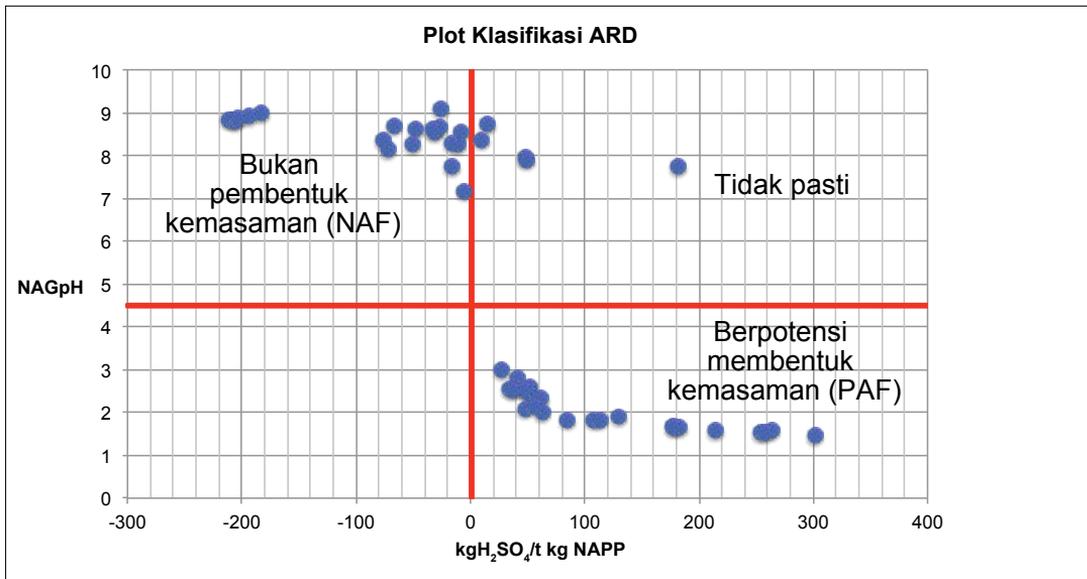
Secara Individu, masing-masing metode uji memiliki keterbatasan, tetapi saat kombinasi uji strategis diterapkan (dipilih sesuai dengan sifat timbunan, kerumitan geologi, reaktivitas sulfida atau derajat pelapukan) keandalan klasifikasi DAL sangat ditingkatkan. Misalnya, hasil uji NAG spesiasi dan sulfur spesiasi dapat dibandingkan dengan perhitungan NAPP untuk mengklarifikasi ketidakpastian atau ambiguitas dalam hasil yang dihasilkan oleh masing-masing anggota dari perangkat uji saja. Contoh ini diberikan dalam Gambar 13, yang menggunakan set yang sama sampel diperlihatkan pada Gambar 12. Uji kerja kinetik geokimia tambahan akan diperlukan untuk menetapkan klasifikasi risiko DAL dengan yang sampel yang diberi label 'tidak pasti'.

Table 6: Skema klasifikasi risiko DAL

KLASIFIKASI UMUM RISIKO DAL	KLASIFIKASI RINCI RISIKO DAL		
	KETERANGAN	KLASIFIKASI RISIKO DAL & NMD ¹	KLASIFIKASI RISIKO DAL & NMD & SALIN
Berpotensi membentuk asam (PAF)	Berpotensi tinggi menghasilkan asam (AG1)	AG1	AG1 Salin
	Berpotensi sedang/tinggi menghasilkan asam (AG2)	AG2	AG2 Salin
	Berpotensi sedang menghasilkan asam (AG3)	AG3	AG3 Salin
			AG3 Non-Salin
Berpotensi rendah menghasilkan asam (AG4)	AG4	AG4 Salin	
Non-acid-forming (NAF)	Tidak berpotensi menghasilkan asam (UAG)	UAG	UAG Salin
			UAG Non-Salin
		UAG NMD	UAG NMD Salin
			UAG NMD Non-Salin
	Berpotensi sebagai penetral asam (LAC)	LAC	LAC Salin
			LAC Non-Salin
LAC NMD		LAC NMD Salin	
		LAC NMD Non-Salin	

NMD = pH drainase tambang netral (pH 6-8).

Gambar 13: Perbandingan antara hasil uji ABA dan NAG pada set sampel yang diperlihatkan pada Gambar 12



Poin-poin utama tentang kriteria klasifikasi DAL

Sistem klasifikasi 'generik' DAL berdasarkan data dari tempat lain yang menentukan pemotongan (cut-off) % sulfur, nilai NAPP dengan nilai ambang batas lebih besar dari atau kurang dari nol (misalnya, +/- 10) atau cut-off nilai NAG rendah tidak harus diterapkan untuk penilaian akhir dari risiko DAL tanpa didukung oleh data spesifik lokasi.

Mengingat rumitnya masalah yang terlibat, harus dicari saran ahli pada tahap awal pengembangan proyek guna membantu personil lokasi dalam menafsirkan hasil, mendefinisikan jenis bahan geokimia dan mengembangkan pemahaman tentang implikasi sifat geokimia untuk pengelolaan selama operasi dan setelah penutupan. Penilaian yang ketat harus dilakukan sebelum mengadopsi nilai-nilai klasifikasi dari lokasi lain untuk mengkonfirmasi bahwa mereka memiliki geologi dan geokimia cukup mirip.

Untuk lokasi tertentu, mungkin harus menetapkan kombinasi parameter yang terbaik untuk memfasilitasi klasifikasi sampel lokasi-lebar. Parameter dan kriteria klasifikasi DAL terkait akan lokasi-spesifik dan hanya boleh digunakan setelah menyelesaikan tinjauan rinci hasil lengkap uji-uji geokimia statis, idealnya ditambah data kinetik, dan dengan mempertimbangkan rencana tambang dan jadwal. Contoh pengembangan dan pelaksanaan klasifikasi lokasi-spesifik disediakan dalam beberapa studi kasus dalam buku ini.

4.4 Pemodelan blok DAL dan penjadwalan bahan

Kemungkinan perilaku geokimia atau klasifikasi DAL dari satuan batuan individu dapat dinilai dari hasil program uji kerja statis yang diuraikan di atas. Namun, kemungkinan masalah DAL lokasi berkembang dan pelaksanaan pilihan yang efektif untuk mengelolanya tergantung pada pemahaman kuantitas, distribusi dan waktu ekstraksi dari setiap jenis bahan tambang yang terpapar oksigen oleh penggalian atau pengeringan. Ini mencakup semua jenis bahan tambang yang ditetapkan pada Tabel 6, bukan hanya materi pembentuk kemasaman.

Tingkat berikutnya interpretasi melibatkan penerapan data uji geokimia statis untuk desain proyek atau konfigurasi yang diselidiki untuk memperkirakan waktu kondisi paparan oksidasi bahan PAF dan untuk memprediksi sejauh mana potensi pembentuk DAL. Ini membutuhkan:

- membangun database lubang bor yang bermuatan data karakterisasi geokimia tersebut dengan
- menggunakan database lubang bor untuk memperbaiki model geologis 3D yang mendefinisikan penyebaran semua jenis bahan yang berpotensi untuk ditambang atau terpapar ke oksigen
- membangun model blok DAL guna mengakses kuantitas, terjadinya dan penyebaran berbagai jenis bahan geokimia (klasifikasi DAL) dalam timbunan
- mengembangkan jadwal bahan LoM untuk gangguan atau pengeringan jenis-jenis batuan geokimia, berdasarkan model blok DAL
- pemodelan spasial urutan penimbunan batuan sisa dengan tipe batuan geokimia guna meminimalkan risiko DAL di masa depan, berdasarkan model blok DAL dan jadwal bahan tambang yang
- memprediksi seberapa luas kemungkinan oksidasi spasial dalam zona yang dikeringkan (yaitu, kuncup depresi) di sekitar tambang berbasis karakteristik fisik, kondisi iklim, neraca air, data hidrogeologi dan parameter lain yang mempengaruhi hasil DAL.

Model blok DAL jelas berbeda dari model blok geologi yang digunakan untuk merancang program sampling awal (Scott et al. 1996), karena model tersebut juga menggabungkan hasil dari kerja karakterisasi bahan dalam konteks risiko. Blok pemodelan untuk tujuan penilaian DAL mirip dengan pemodelan sumber daya bijih, seperti yang digunakan untuk menghitung volume material dan karenanya tonase (Downing & Giroux 2014).

Sulfur total adalah parameter yang paling umum digunakan untuk penyaringan pada tahap pertama pengembangan model blok DAL, sebelum hasil dari uji kerja karakterisasi yang lebih rinci tersedia.

Ketersediaan data awal untuk menentukan limbah umumnya, tapi tidak perlu, relatif rendah terhadap data yang dikumpulkan untuk definisi awal tubuh bijih. Rio Tinto, misalnya, biasanya melengkapi analisis sulfur (dan karbon) pada sebagian sampel inti bor apakah menjadi bijih atau limbah. Setelah dikalibrasi menggunakan program uji geokimia pada subset dari sampel, informasi ini dapat digunakan awalnya untuk mengisi model blok DAL.

Dalam kebanyakan kasus, tetap ada kebutuhan untuk terus memperbaiki model blok DAL dengan informasi yang lebih luas tentang distribusi dan volume jenis limbah sementara pertambangan berlangsung. Kegagalan untuk melakukannya merupakan penyebab umum masalah pengelolaan tak terduga. Memang, penilaian awal dari risiko DAL berkapasitas rendah dapat perlu direvisi selagi diperoleh informasi lebih lanjut tentang tubuh bijih dan limbah yang terkait.

Resolusi spasial blok model DAL (yaitu, ukuran blok) harus kuat dan praktis untuk memfasilitasi pelaksanaan oleh tambang perencana/manajer. Jika blok terlalu kecil atau terlalu besar, mereka mungkin tidak dapat dipisahkan selama pertambangan dan mungkin tidak menentukan dengan benar distribusi bahan tambang yang dipilih dari database.

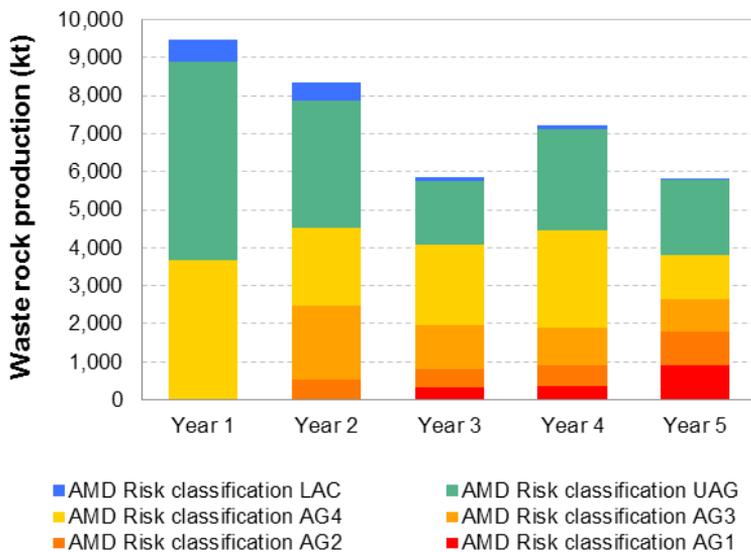
Model blok dan bahan tambang terkait jadwal memiliki implikasi yang signifikan untuk perencanaan tambang (seperti desain WRD) dan manajemen operasional tambang secara harian, mingguan, bulanan dan tahunan. Dengan demikian, perlu ada koordinasi yang erat antara personil yang sedang mengembangkan model blok DAL dan perencana tambang. Jalan pintas yang diambil dalam deposisi limbah untuk mencapai penghematan biaya langsung dapat secara substansial diimbangi dengan jangka panjang DAL berikutnya dan biaya pengelolaan kualitas air. Secara khusus, penentuan waktu produksi bahan DAL yang berisiko tinggi akan menentukan kapan materi bersih yang cukup harus tersedia untuk enkapsulasi, sehingga jumlah waktu bahan berisiko tinggi tetap terpapar diminimalkan.

Selain mengembangkan jadwal produksi limbah tambang, juga akan diperlukan untuk menentukan geokimia jenis bahan dan volume terpapar di dinding pit akhir, serta di pengurukan dan gua zona berpori di tambang bawah tanah. Pekerjaan ini diperlukan untuk membantu dalam memprediksi risiko DAL pasca-penutupan untuk danau pit akhir dan pekerjaan bawah tanah.

Contoh jadwal produksi batuan sisa (berdasarkan klasifikasi DAL) yang dapat diproduksi menggunakan pemodelan blok DAL diperlihatkan pada Gambar 14. Klasifikasi risiko DAL pada Tabel 6 yang digunakan untuk menghasilkan jadwal ini. Sifat fisik masing-masing jenis bahan juga harus dikodekan dalam model blok, karena mempengaruhi metode konstruksi dan kesesuaian dengan menggunakan bahan-bahan untuk rehabilitasi.

Sementara diskusi di atas difokuskan pada lokasi tambang greenfield, proses untuk mengembangkan model blok DAL dapat diterapkan untuk brownfield dan lokasi warisan. Namun, yang terpapar yang sudah ada dan sebagian sudah mengoksidasi ex-bahan di tempat mungkin jauh lebih menantang untuk dikarakterisasi dan pemodelan dari pada bahan segar di tempat karena sejauh variabel oksidasi yang terjadi dan distribusi biasanya heterogen dari lithotipe asli.

Gambar 14: Contoh produksi tahunan batuan sisa, menurut klasifikasi DAL



Studi Kasus 2: Penggunaan data karakterisasi untuk mengarahkan pengelolaan PAF yang tepat dari limbah tambang batubara, tambang batubara Stockton, Selandia Baru

Konteks

Tambang batubara Stockton, yang dimiliki oleh Solid Energy New Zealand Ltd, adalah tambang batubara terbuka terbesar di Selandia Baru. Tambang ini terletak antara 500 m dan 1.100 m di atas permukaan laut dalam Brunner Coal Measures (BCM) dari lapangan batubara Buller di pantai barat South Island. Iklim yang dingin dan basah, dengan curah hujan sekitar 6.000 mm per tahun dan suhu rata-rata 8°C (Solid Energy 2015).

Kewajiban lingkungan signifikan yang ada dikaitkan dengan sejarah permasalahan DAL di lokasi, dan tambang batubara Stockton mengharapakan untuk memulihkan ini selamanya. Seperti di banyak lokasi, ada peningkatan muatan kemasaman dengan meningkatnya laju aliran untuk sungai yang dipengaruhi oleh DAL, memperlihatkan pembilasan yang tersimpan dalam produk oksidasi asam dari bekas tempat batuan sisa. Lokasi ini saat ini mengolah sekitar 6.000 sampai 10.000 ton (H_2SO_4) kemasaman per tahun, meskipun muatan kemasaman ini meningkat karena lebih banyak pembentuk asam batuan sisa yang terganggu.

Studi kasus ini menyoroti program ekstensif karakterisasi geokimia yang sedang digunakan untuk mengembangkan dan menerapkan strategi pengelolaan yang lebih baik untuk saat ini dan masa depan limbah PAF yang dihasilkan dari daerah tambang baru.

Lingkungan geologi

BCM terbentuk dalam transgresi laut periode Kapur Akhir dan Awal Tersier dalam lingkungan muara memiliki pasokan siap sulfat berasal dari intrusi periodik air laut. BCM tersebut ditindih oleh batulumpur Kaiata. Kedua unit terdiri dari kuarsa detrital, albit, muscovite, dan kaolinit. Pirit adalah sulfida paling umum di langkah-langkah batubara dan hadir karena keduanya pirit framboidal (halus) dan kristal euhedral kasar sangat reaktif. Sejak BCM yang biasanya kekurangan karbonat, kehadiran pirit hampir selalu mengarah pada pembentukan DAL saat batuan sisa terpapar. Konten pirit batuan tanah liat Kaiata telah menurun dan meningkatkan konten karbonat dengan jarak dari persinggungan BCM, sehingga lebih tinggi di kolom stratigrafi yang Kaiata adalah NAF sesuai teknik klasifikasi ABA. Namun, total volume NAF di lokasi ini sangat rendah dibandingkan dengan batuan sisa PAF, dan ini membatasi pilihan yang melibatkan penempatan selektif dan pengelolaan limbah (misalnya, enkapsulasi batuan PAF sisa dengan batuan sisa NAF).

Karena prevalensi pirit framboidal dan kurangnya mineral penetral, batuan Stockton yang terganggu dapat menghasilkan DAL dalam beberapa hari. Oleh karena itu program pengambilan sampel geokimia ditetapkan untuk memprioritaskan materi yang perlu ditutup secepatnya, guna memastikan penempatan bahan PAF yang benar dan untuk mengidentifikasi area untuk langkah-langkah pengelolaan lebih lanjut seperti aplikasi batuan kapur hancur untuk membatasi timbulnya kemasaman.

Tindakan-tindakan Batubara Brunner—karakterisasi ABA

Pada tahun 2010, lebih dari 220 sampel telah dianalisis dari BCM untuk karakteristik ABA. Dari jumlah tersebut, setidaknya 100 memiliki rangkaian (suite) lengkap analisis ABA (pasta pH, NAG, NAPP) dan sisanya hanya data MPA dan NAG. Data dari BCM ini memperlihatkan bahwa ada kelebihan MPA (rata-rata = 22,5 kg H₂SO₄/t) dibandingkan dengan ANC (rata-rata = 2,9 kg H₂SO₄/t), mencerminkan kurangnya bahan karbonat di BCM (Paus et al. 2010). Berdasarkan dataset ini ada keyakinan bahwa BCM yang terkandung sangat sedikit ANC. Oleh karena itu, uji untuk ANC dihentikan dan dalam perhitungan masa itu diasumsikan nol.

Sebuah program sampling tiphead harian dilaksanakan untuk menentukan sulfur (total), dan tren di seluruh pirit, di lokasi (Weber et al. 2008). Hasil dari program sampling tiphead dan proses karakterisasi ABA yang lebih rinci menegaskan bahwa batulumpur dan karbon unit BCM berpotensi lebih besar untuk menghasilkan kemasaman dibandingkan dengan unit batuan pasir kasar dari BCM. Selain itu, data memperlihatkan bahwa secara geografis, wilayah utara lokasi tersebut memiliki sulfur yang lebih tinggi terkait dengan lingkungan pengendapan palaeo-lingkungan yang lebih muara, dibandingkan dengan selatan lokasi, yang lebih didominasi oleh fluvial (air tawar) dan biasanya memiliki MPA <5 kg H₂SO₄/ton. Data tersebut memungkinkan pengembangan rencana pengelolaan DAL, di mana prioritas diberikan kepada bahan capping (penutupan cungkup) dari daerah utara. Batulumpur yang khusus dibenamkan pada inti WRD; dan pengolahan DAL aktif dimulai di Stream Mangatini, yang dikeringkan di daerah utara ini.

Batulumpur Kaiata—karakterisasi ABA

Sejumlah penelitian telah dimulai pada tahun 2006 untuk menentukan karakteristik batuan sisa ABA yang terkait dengan pit Cypress yang baru diusulkan pada tambang tersebut. Sampel diambil dari 12 lubang dibor melalui batulumpur Kaiata ke BCM mendasari seluruh jejak yang diharapkan dari pit. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa pembentukan BCM dari lokasi ini memiliki karakteristik yang sangat mirip dengan apa yang telah ditemukan sebelumnya (lihat di atas)—yaitu, ada sedikit ANC—sehingga semua unit BCM diklasifikasikan sebagai PAF.

Namun, batulumpur NAF Kaiata ada di dalam pit Cypress, dan penyelidikan geokimia tambahan dilakukan untuk menentukan implikasi bagi pengelolaan. Hasilnya memperlihatkan bahwa beberapa sampel diklasifikasikan sebagai PAF dengan uji NAG (NAG pH <4,5) memiliki nilai pH pasta lebih besar dari 6,0. Untuk materi ini (yang berisi ANC moderat) akan ada jeda waktu untuk mulainya asam, seperti yang divalidasi oleh pengujian kinetik NAG dan pengujian kolom berbasis lapangan (200 L drum). Hasil penelitian memperlihatkan bahwa pH pasta adalah indikator yang baik dari reaktivitas asam-basa langsung dari batuan sisa. Oleh karena itu sebuah sistem klasifikasi menggabungkan pH pasta dan hasil pH NAG diusulkan untuk pit Cypress. Ini diringkas dalam Tabel 1, yang juga menjelaskan proses pengelolaan untuk setiap jenis batuan sisa.

Sebagai bagian dari proses keterlibatan pemangku kepentingan, metodologi ini telah diperiksa oleh para ahli independen. Diberitahukan bahwa penggunaan pH pasta mungkin tidak sesuai untuk batuan segar, dan bekerja lebih dari yang direkomendasikan. Solid Energy mengakui bahwa perbaikan berkesinambungan seperti metodologi klasifikasi DAL dan model tersebut dibenarkan karena hal ini akan meningkatkan pengelolaan batuan sisa dan dengan demikian mengurangi kewajiban DAL.

Pekerjaan tambahan yang dilakukan dijelaskan di bawah ini.

Tabel 1: Sistem klasifikasi berbasis pH NAG and pH pasta untuk batulumpur Kaiata

KLASIFIKASI	KRITERIA UJI	PENDEKATAN PENGELOLAAN
NAF	pH pasta > 6 pH NAG > 4,5	Kemungkinan sesuai untuk digunakan sebagai bahan rekayasa (diperlukan uji lanjut).
PAF: Lag ke AMD	pH pasta > 6 pH NAG < 4,5	Enkapsulasi untuk mengurangi oksigen air masuk berikutnya sebelum pembentukan DAL.
PAF: Risiko medium	pH pasta 4-6 pH NAG < 4,5	Netralisasi ¹ dibutuhkan, dilanjutkan segera dengan enkapsulasi.
PAF: Risiko tinggi	pH pasta < 4 pH NAG < 4,5	Netralisasi ¹ dibutuhkan, dilanjutkan segera dengan enkapsulasi.

¹ Lokasi ini akan menerapkan bahan netralisasi untuk masing-masing lift WRD guna meminimalkan jumlah kemasaman yang dihasilkan oleh batuan sisa PAF.

Pengoperasian program karakterisasi DAL yang telah ditingkatkan dan pengelolaan batuan sisa tambang: pit Cypress

Pada tahun 2015, selagi operasi dimulai pada pit Cypress, Solid Energy menyelesaikan penelitian batuan sisa ABA baru, termasuk tinjauan dari proses klasifikasi (Tabel 1) dan penentuan kemasaman yang terkandung dalam batuan sisa baru yang baru saja diledakkan. Ini digunakan untuk membantu merancang rekayasa bentuk lahan Cypress utara (NELF) guna meminimalkan oksidasi pirit dan pembentuk drainase dampak DAL dari lokasi.

Hasil dari pengujian ABA atas 42 sampel diulas terhadap kriteria persetujuan sumber daya yang relevan (persyaratan klasifikasi peraturan) dan proses klasifikasi perbaikan dilaksanakan (Tabel 2) untuk mengembangkan model blok yang disempurnakan agar dapat mendefinisikan lebih baik batuan sisa untuk pilihan pengelolaan. Berdasarkan jumlah sampel dalam setiap pengelompokan klasifikasi dan NAPP rata-rata (mean) untuk kelompok tersebut, muatan kemasaman potensi lokasi untuk masing-masing kelompok ditentukan sebagai persentase dari total.

Penilaian kemasaman yang terkandung dalam batulumpur Kaiata dengan metode yang diusulkan oleh pedoman tanah asam sulfat Australia (Ahern et al. 2004) memperlihatkan bahwa larutan dalam air yang dapat diekstrak titratable kemasamannya adalah ~ 3 kg H_2SO_4 /ton 2-3 minggu setelah peledakan, dan sebelum penambangan bahan yang diledakkan, dan ~ 7 kg H_2SO_4 /ton 5 minggu setelah peledakan (jenis jarosit yang bermuatan kemasaman adalah < 1 kg H_2SO_4 /ton, tetapi yang lebih besar untuk sampel yang lebih tua). Temuan ini mengindikasikan adanya pirit yang sangat reaktif. Pengetahuan tersebut menyarankan bahwa klasifikasi yang diusulkan (Tabel 2) sesuai untuk tujuan dan waktu dari paparan awal oleh peledakan untuk pembenaman di NELF perlu diminimalkan. Pendekatan ini dimasukkan ke dalam rencana pengelolaan DAL untuk lokasi.

Untuk area studi, data memperlihatkan bahwa sekitar 76% dari sampel batuan sisa PAF atau asam tinggi membentuk (HAF), terhitung 94,5% dari potensi muatan kemasaman. Analisis memperlihatkan bahwa pengelolaan batuan sisa yang baik dari kelompok HAF (mewakili 26% dari batuan sisa) akan menanggulangi sekitar 55% dari total potensial muatan kemasaman, mewakili kesempatan untuk secara substansial mengurangi muatan kemasaman keseluruhan untuk lokasi. Dengan menggunakan data ini, strategi pengelolaan yang telah disetujui untuk lokasi termasuk penempatan semua HAF dalam pusat NELF, yang akan dikelilingi oleh PAF dengan risiko rendah dan bahan NAF pada permukaan luar dari NELF. Bentuk lahan ini sedang dibangun di ketinggian 5m untuk meminimalkan masuknya adveksi dan konvektif oksigen dengan penambahan penetral untuk setiap angkat dan pematatan.

Tabel 2: Klasifikasi bahan limbah untuk operasi Cypress, tambang batubara Stockton

KLASIFIKASI	SINGKATAN	KRITERIA	KRITERIA PERSETUJUAN KONDISI YANG RELEVAN	JUMLAH SAMPEL	% DARI POTENSI MUATAN KEMASAMAN ¹
		$H_2SO_4/ton\ kg$	$H_2SO_4/ton\ kg$		
Bukan pembentuk kemasaman	NAF	NAPP < 0	Kemasaman NAG = 0	4	1,5%
Risiko rendah	LR	NAPP > 0 dan ≤ 20	Kemasaman NAG < 20	6	4,0%
Berpotensi membentuk kemasaman	PAF	NAPP > 20 dan ≤ 50	Kemasaman NAG > 20	21	39,7%
Pembentukan kemasaman tinggi	HAF	NAPP > 50	n.a.	11	54,7%

n.a. = not applicable (tidak berlaku).

¹ Muatan potensi kemasaman berasal dari sampel populasi. Model blok masih memerlukan pengembangan untuk menegaskan persentase yang benar.

Kesimpulan

Penyempurnaan proses karakterisasi ABA di Stockton yang berlanjut dan berkesinambungan telah membuahkan pengembangan pemahaman geokimia yang kuat dan model untuk batuan sisa di lokasi. Untuk BCM, pengambilan sampel tiphead telah mengkonfirmasi distribusi geografis dari batuan sisa PAF tinggi, yang telah diprioritaskan untuk capping. Untuk batulumpur Kaiata skema klasifikasi yang disempurnakan telah dikembangkan, dan telah digunakan untuk merancang NELF Cypress guna meminimalkan masuknya oksigen ke batuan sisa HAF yang ditempatkan dalam inti WRD.

Program karakterisasi geokimia yang berkesinambungan merupakan langkah utama untuk mengarahkan pengelolaan berisiko tinggi limbah sulfida di lokasi. Data tersebut digunakan untuk lebih efektif membendung bahan PAF tinggi dan dengan demikian mengurangi biaya perawatan. Telah terbukti di lokasi ini bahwa karakterisasi ABA yang efektif dapat membantu perencanaan strategis untuk meminimalkan produksi DAL.

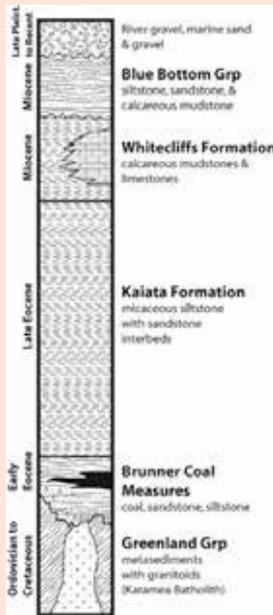
REFERENSI

Ahern, CR, McElnea, AE, Sullivan, LA (2004). *Acid sulfate soils laboratory methods guidelines*. Queensland Department of Natural Resources, Mine and Energy, Indooroopilly, Queensland, Australia.

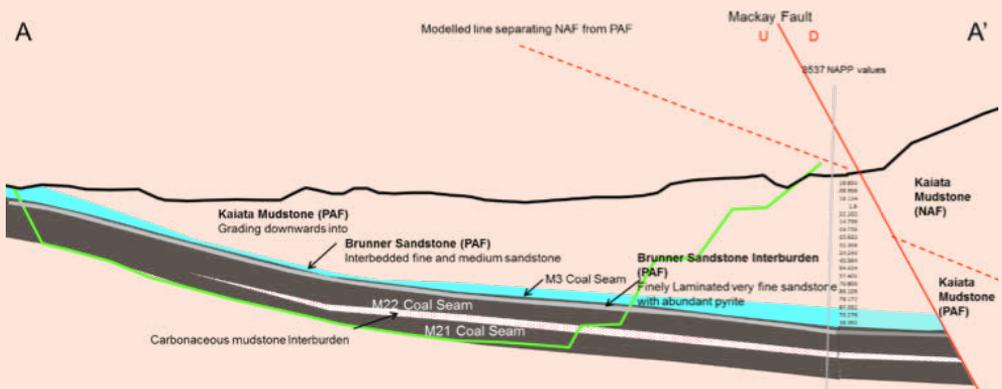
Pope, J, Weber, P, Mackenzie, A, Newman, N, Rait, R (2010). 'Correlation of acid base accounting characteristics with the geology of commonly mined coal measures, West Coast and Southland, New Zealand', *New Zealand Journal of Geology and Geophysics Special Edition: Mine Drainage*: 53 (2&3):153-166.

Solid Energy (2015). 'Stockton Mine', website accessed 10 March 2015, <http://www.solidenergy.co.nz/operations/stockton-mine/>.

Weber, P, Lindsay, P, Hughes, J, Thomas, D, Rutter, G, Weisener, C, Pizey, M (2008). 'ARD minimisation and treatment strategies at Stockton Opencast Coal Mine, New Zealand', in Bell, L, Barrie, B, Braddock, B, Mclean, R (eds), *Proceedings of the Sixth Australian Workshop on Acid and Metalliferous Drainage*, 15-18 April 2008, Burnie, Tasmania, pp. 113-137.



Gambar 1: Kolom stratigrafik area Stockton



Gambar 2: Penampang pit utara Cyprus

4.5 Uji geokimia kinetik

Sementara uji kerja statis menilai kemungkinan dan kapasitas maksimum satuan batuan tertentu untuk menghasilkan kemasaman dan buffer, prosedur pengujian kinetik memberikan data tentang berapa cepat kemasaman ini dan/atau buffer (muatan dan konsekuensi DAL) dapat dihasilkan, dan jeda waktu sebelum permulaan pembentuk signifikan AMD. Uji tersebut mengungkapkan proses yang terkait dengan reaktivitas berbagai efisiensi netralisasi mineral sulfida, oksidasi sulfida kinetik dengan mineral karbonat dan/atau silikat (misalnya, klorit), serta pembentukan dan kelarutan tahap mineral sekunder dan karakteristik peleburannya. Uji kinetik biasanya melibatkan oksidasi terkendali dan bentuk pelindian, dan dapat dilakukan di bawah kondisi yang diperkirakan rata-rata kondisi lokasi, kondisi lokasi yang khas terburuk, atau laju oksidasi pirit dipercepat secara artifisial relatif terhadap kondisi lokasi (Bourgeot et al 2011; Pearce et al. 2015).

Tujuan utama uji-uji tersebut untuk menilai:

- tingkat pembentuk kemasaman rata-rata untuk litologi tertentu dan lambat laun untuk domain yang lebih luas (seperti seluruh WRD)
- jeda waktu sebelum mulainya kondisi kemasaman
- durasi oksidasi sulfida dan proses pembentuk kemasaman
- berpotensi DAL
- elemen utama dalam pelindian tertentu
- kemungkinan keberhasilan berbagai pencegahan dan strategi pengendalian DAL.

Laju oksidasi pirit diperoleh dengan menggunakan metode uji kerja kinetik tradisional (misalnya, kolom volume lindi-kecil) mungkin secara substansial berbeda dari yang ditemukan di lokasi tambang karena sejumlah faktor, termasuk kadar air (yang mempengaruhi difusi oksigen ke lokasi reaksi), penyiaran ukuran partikel (terkait dengan luas permukaan yang tersedia untuk bereaksi dengan oksigen), sulfida mineralogi, konsentrasi oksigen di sekitar partikel, kondisi batas yang berbeda dan suhu.

Uji kinetik mulai dari kolom kecil ke lapangan skala uji coba digunakan untuk mengembangkan hubungan antara laju oksidasi pirit dan satu atau lebih dari variabel di atas untuk memungkinkan estimasi yang lebih handal dari laju pembentukan kemasaman di dunia nyata. Misalnya, laju oksidasi pirit dapat ditentukan untuk berbagai fraksi ukuran partikel sampel batuan sisa atau muatan kelembaban. Tingkat tersebut dapat digunakan bersama-sama dengan pengetahuan dari distribusi ukuran partikel batuan sisa di lokasi untuk memprediksi laju pembentukan kemasaman. Rangkaian uji kinetik digunakan untuk mengukur oksidasi sulfida, dan karenanya laju pembentuk DAL, seperti digambarkan di bawah ini.

4.5.1 Uji kolom lindi dan sel kelembaban

Uji kolom lindi dan uji sel kelembaban biasanya digunakan untuk menilai perilaku geokimia kinetik bahan tambang. Uji ini biasanya melibatkan pengaliran sampel hancuran batuan tambang atau pabrik tailing ke siklus pembilasan berikutnya dan pengeringan. Pengujian dapat dilakukan di lapangan di lokasi tambang atau di laboratorium. Jika dilakukan di laboratorium, penting agar proses pembilasan tidak memperlambat oksidasi sulfida dengan menghambat masuknya udara ke sampel, meskipun beberapa pengujian dapat diselesaikan di bawah kondisi jenuh jika limbah tambang tersebut rencananya akan disimpan di bawah air penutup, untuk contoh. Rezim pelindian harus dipilih untuk mengoptimalkan oksidasi tetapi tetap secara luas konsisten dengan kondisi iklim di lokasi.

Kolom resapan dan pengujian sel kelembaban dapat dilakukan dari sampel kecil (misalnya, ukuran bahan ~2 kg dari <4 mm) hingga besar (misalnya, ~30-50 kg dari ukuran <40 mm). Ukuran kolom yang lebih besar dapat digunakan, jika perlu, untuk memeriksa lebih lanjut faktor peningkatan. Semakin besar massa sampel yang diperoleh, semakin besar pula berbagai ukuran partikel yang dapat berpotensi diuji. Beberapa kolom juga dapat ditetapkan untuk menilai berbagai skenario pengelolaan (sistem lapisan penutup campuran dan perawatan).

Kolom pelindian dan sel kelembaban yang baik untuk mengidentifikasi elemen utama yang ditentukan dari air pelindian dan perubahan yang diungkapkan dalam kimia lindi seiring waktu berlangsungnya pelapukan. Namun, sulit secara langsung menghubungkan atau menyesuaikan perubahan kimia air dan konsentrasi larutan logam dalam air lindi terhadap kualitas air di lokasi yang akan berkembang. Sementara unsur-unsur tertentu dapat memberi tahu lindi yang akan diproduksi di lapangan, konsentrasinya tidak mungkin diprediksi dengan baik oleh uji kolom laboratorium. Oleh karena itu, sementara pedoman perbandingan langsung antara kualitas air dan lindi dari kolom resapan dan kelembaban sel-sel dapat memberikan konteks, perbandingan tersebut harus ditangani secara berhati-hati.

Dalam situasi di mana tidak ada sulfida yang terdapat dalam sampel batuan, kolom lindi atau sel kelembaban masih dapat digunakan untuk menilai kualitas lindi.

Uji kinetik lindi umumnya perlu untuk beroperasi selama minimal enam bulan dan dalam beberapa kasus dari 12 hingga 24 bulan sebelum data cukup tersedia untuk interpretasi efektif karakteristik DAL dari suatu bahan. Kerangka waktu yang lebih panjang mungkin terlibat dalam tambang batuan keras, misalnya, untuk mengevaluasi kinerja perlakuan khusus atas tanah/batuan campuran, atau untuk sampel yang memiliki jeda waktu lama untuk terjadinya pembentukan DAL.

Masalah lain yang perlu dipertimbangkan dan/atau diatasi saat menafsirkan data yang dihasilkan oleh metode ini adalah sebagai berikut.

- Menyimpulkan laju oksidasi pirit dari kolom resapan dan sel kelembaban dengan mengukur pelepasan rata-rata larutan sulfat saja dapat dikompromikan dalam beberapa kasus oleh potensi retensi sulfur sebagai mineral sulfat sekunder (seperti jarosit atau gipsium) atau untuk pelepasan sulfur yang ditingkatkan dari mineral sulfat terlarut yang sudah ada (seperti gipsium atau melanterit) dalam kasus bahan yang sudah sebagian teroksidasi.
- Bahkan jika laju oksidasi pirit dapat diperkirakan dari data pelindian, sulit untuk mengkaitkannya langsung ke kondisi lokasi tambang karena efek dari kejenuhan variabel serta pengaruh mikro dan makro properti struktural (misalnya, distribusi ukuran partikel dan efek dari metode penempatan limbah).
- Adanya bakteri acidofilik dan/atau pengoksidasi-besi secara substansial dapat mempengaruhi laju produksi DAL di lingkungan nyata. Dalam beberapa kasus, harus diperhitungkan untuk melakukan serangkaian uji inokulasi dengan bakteri.
- Hal ini dapat menantang untuk pengendalian atau perbaikan sampel kadar air untuk uji ini, meskipun perbaikan dapat dicapai (seperti diperlihatkan pada Gambar 15). Oleh karena itu, umumnya tidak mudah untuk menilai hubungan antara laju pembentuk DAL dan kelembaban isi sampel.
- Pengujian bahan butiran halus dapat menantang karena porositas yang rendah, tingkat desaturasi yang lambat irigasi atau pengeringan intens setelah sampel yang terjadi jika lampu panas digunakan untuk mensimulasikan sinar matahari dan percepatan proses pengeringan.
- Dalam beberapa kasus, dapat sulit untuk menyesuaikan kebutuhan untuk mensimulasikan kondisi iklim dari lokasi dengan kebutuhan untuk mengumpulkan lindi yang cukup untuk analisis. Misalnya, untuk bahan limbah diambil dari lokasi yang berlokasi di lingkungan gersang, laju aplikasi air mungkin perlu jauh lebih tinggi daripada curah hujan tahunan yang setara untuk menghasilkan lindi yang cukup untuk analisis dalam rezim pengujian dengan waktu terbatas.

Metode uji kerja kinetik alternatif yang dibahas di bawah telah dikembangkan untuk mengatasi beberapa keterbatasan kolom dan sel kelembaban uji dalam memperkirakan laju oksidasi sulfida.

Gambar 15: Contoh pengendalian muatan kelembaban dalam suatu kolom uji kinetik



Sumber: Robertson et al. (2015).

4.5.2 Uji konsumsi oksigen

Metode konsumsi oksigen didasarkan pada prinsip bahwa sulfida reaktif seperti pirit termakan oleh oksigen atmosfer karena teroksidasi. Laju produksi kemasaman dari dekomposisi pirit secara stoikiometrik terkait dengan konsumsi oksigen. Metode konsumsi oksigen dapat diterapkan langsung dalam WRD atau timbunan tailing atau dapat dilakukan di laboratorium.

Di laboratorium, massa yang dikenal sebagai bahan mengandung pirit disumbat rapat dalam bejana (vessel/wadah) dengan volume yang ditentukan. Setelah uji dimulai, oksigen dalam bejana tersebut dikonsumsi melalui oksidasi pirit (Anderson et al. 1999; Bennett et al 2005; Bourgeot et al 2011; Pearce et al 2015). Konsentrasi oksigen internal secara otomatis diukur dan dicatat (misalnya, setiap 10-60 menit) selama periode pengukuran (misalnya, 1-8 minggu). Karena gas karbon dioksida dapat dihasilkan sebagai akibat dari oksidasi karbon netralisasi karbonat atau bakterial (misalnya, dari tanah asam sulfat), beberapa metode uji kerja juga mengukur CO_2 untuk menyempurnakan akurasi dan meningkatkan informasi yang diperoleh melalui uji kerja konsumsi oksigen konvensional. Setelah uji kerja oksidasi selesai, sampel dapat dibilas dengan air deionisasi dan kimia lindi dianalisis untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang dapat menimbulkan kekhawatiran.

Teknik konsumsi oksigen menggabungkan data awal ABA statis dan akhir kimia pelindian mungkin memberikan sejumlah keunggulan dibandingkan uji meja laboratorium kinetik biokimia lainnya, termasuk:

- penentuan laju oksidasi sulfida lebih cepat (seperti dalam hari)
- pengukuran langsung konsumsi oksigen, yang dapat memberikan laju rata-rata yang sangat akurat dan jelas dibandingkan dengan metode lain
- kemampuan memprediksi jeda waktu dalam jangka pendek sebelum penipisan sepenuhnya kapasitas penetralan asam

- biaya berpotensi lebih rendah karena biaya analitis yang lebih rendah dan durasi uji lebih pendek
- kemampuan untuk dengan mudah beradaptasi pada prosedur uji untuk menguji efektivitas strategi pengelolaan lokasi, termasuk air dan lapisan tanah penutup, atau berbagai desain WRD.

Metode konsumsi oksigen juga merupakan metode yang berguna untuk dengan cepat menilai potensi pembakaran spontan bahan tambang sulfida, dan semakin sering digunakan di penilaian metalurgi atas logam yang dilepaskan dari zona blok gua di tambang bawah tanah serta stockpile bijih dan produk konsentrat.

4.5.3 Uji penetrasi oksigen

Saat proses transportasi gas advectif atau konvektif mengendalikan oksidasi sulfida, metode kinetik kelembaban sel atau konsumsi oksigen konvensional dapat cukup diterapkan untuk mengestimasi laju oksidasi maksimal. Namun, pengangkutan oksigen melalui bahan tak jenuh yang sangat halus sering 'difusi terbatas'. Misalnya, dalam endapan tailing, bahkan jika kedalaman tailing tak jenuh meluas sampai beberapa meter, hanya sebagian kecil dari kedalaman yang disesuaikan dengan kondisi pengoksidasian. Hal ini disebabkan konsumsi oksigen seluruh profil tailing pada tingkat yang melebihi pemasokan ulang oksigen atmosferik karena keterbatasan difusi-terkendali. Karena itu mengukur laju oksidasi pirit dalam tailing difusi-terbatas dapat sulit, karena kemungkinan tingkat-ketinggian muka air menurun secara progresif-antar muka tailing ke kedalaman terakhir dalam ruang pori adalah nol.

Untuk dapat melakukan perhitungan laju pembentukan kemasaman di bawah kondisi seperti ini secara realistis, dapatlah mengukur kedalaman quasi-steady-state penetrasi oksigen ke dalam tumpukan bahan halus (seperti tailing atau pasir mineral) dan kemudian mengukur fluks oksigen yang sesuai (yaitu, tingkat difusi oksigen) per unit luas permukaan. Ini telah dicapai di lapangan dan di laboratorium melalui aplikasi uji profil difusi oksigen (Martin et al. 2006).

Bahan sulfidik halus ditempatkan dalam silinder yang atasnya terbuka dan diinstrumentasi di beberapa kedalaman untuk mengukur konsentrasi oksigen dan karbon dioksida, dan terkadang kadar air. Uji dapat dirancang untuk mensimulasikan kondisi lokasi seperti kerapatan, kadar air dan suhu rata-rata, dalam operasi atau pun setelah penutupan. Setelah mencapai profil oksigen quasi-steady-state dengan kedalaman (misalnya, dalam beberapa minggu atau bulan), silinder disumbat dan fluks oksigen ke permukaan atas bahan berbutir halus ini login lebih dari 1-5 hari. Dalam kombinasi, data ini memungkinkan pengukuran ketebalan tahap-dini zona oksidasi dan laju pembentukan kemasaman sebagai fungsi dari luas permukaan.

Sementara laju oksidasi dalam sistem adveksi atau konveksi terkendali dapat didefinisikan relatif terhadap massa bahan oksidasi, tingkat dalam sistem difusi-terkendali lebih tepat didefinisikan relatif terhadap luas permukaan bahan yang terpapar. Perhatikan bahwa dalam beberapa kasus pengembangan hard pan pada permukaan tailing dapat mempengaruhi muatan kelembaban tailing dan penetrasi oksigen ke dalam tailing di bawahnya (Gilbert et al 2003; McGregor & Blowes 2002; dan Robertson et al 2015).

Karena silinder profil difusi oksigen tidak perlu diairi (tidak seperti uji kolom resapan), maka dapat juga digunakan untuk mensimulasi dengan potensi lebih akurat dan menguji berbagai strategi penutupan di bawah kondisi kelembaban yang pada pokoknya telah stabil.

Model komputer seperti PYROX (Wunderly et al. 1996) juga dapat digunakan untuk menyelidiki efek kejenuhan pada laju oksidasi. PYROX adalah model numerik yang mensimulasikan satu dimensi, difusi oksigen yang terkendali secara kinetik ke zona permukaan tak jenuh dari tailing tambang dan kelanjutannya oksidasi mineral sulfida, seperti pirit.

Studi kasus 3: Penggunaan data uji statis dan kinetik dalam strategi pengelolaan limbah untuk bahan PAF, Newcrest Cadia Valley Operations, New South Wales

Konteks

Cadia Valley Operation (CVO), yang dimiliki dan dioperasikan oleh Newcrest Mining Ltd, adalah salah satu operasi tambang emas terbesar Australia. CVO terletak di pusat sebelah barat New South Wales, sekitar 25 km dari kota Orange. Tahap penambangan saat ini dimulai setelah Newcrest menemukan cadangan emas-tembaga porfiri Cadia pada tahun 1992. Lebih dari 8 juta ounce (1 ounce = 31,1035 gram) emas telah dihasilkan dari CVO sejak produksi komersial dimulai pada tahun 1999.

Saat ini CVO memiliki dua tambang yang beroperasi—tambang bawah tanah Cadia East dan Ridgeway. Tambang terbuka Cadia Hill yang semula sedang di bawah perawatan dan pemeliharaan. Cadia East tambang baru bawah tanah mulai produksi komersialnya pada tanggal 1 Januari 2013. Studi kasus ini mendokumentasikan evolusi karakterisasi limbah dan program pemodelan blok untuk pit Cadia, yang pembelajarannya telah diterapkan pada operasi saat ini. Ini merupakan pembaruan dari studi kasus yang terdapat dalam edisi pertama seri ini (Mengelola limbah tambang sulfida dan asam, Environment Australia, 1997).

Tata letak geologis

Spesies sulfida utama adalah pirit dan kalkopirit, dengan bornit yang lebih rendah, kalkosit dan asesori mineral lainnya, yang terdapat dalam urat-urat dan sebagai diseminasi dalam batuan setempat (Holliday et al. 2002). Proporsi limbah untuk bijih di pit Cadia Hill selama umur tambang sekitar 1,4:1. Diperkirakan sekitar 430 juta ton batuan sisa akan dihasilkan selama LoM pit Cadia Hill (Cadia Holdings Pty Ltd 2009a).

Karakterisasi DAL klasifikasi di Cadia Hill

Tantangan mengidentifikasi secara akurat limbah PAF telah menjadi masalah yang berkembang di CVO. Usaha mencirikan AMD dimulai di Cadia pada awal tahun 1992 dan telah disempurnakan seiring waktu dengan uji kerja yang berkesinambungan.

Antara tahun 1992 hingga 1995, penelitian awal karakterisasi limbah dilakukan sebagai bagian dari analisis dampak lingkungan Proyek Cadia (environment impact statement (EIS)). Uji kerja awal yang memberikan parameter untuk dasar pemodelan limbah pit Cadia Hill. Model DAL pertama diproduksi pada tahun 1995, yang mengestimasi 36% dari limbah di Cadia Hill akan menjadi PAF. Model ini telah direvisi pada tahun 1996, dengan estimasi bahan PAF meningkat menjadi 38%. Parameter model yang dijabarkan ke dalam kelimpahan potongan sulfida, yang digunakan untuk klasifikasi awal limbah in-pit di Cadia Hill. Satu cut-off yang lebih besar dari 'jejak' visual login pirit diklasifikasikan PAF di pit Cadia Hill, yang berhubungan pada pirit >0,35%. Ringkasan proses yang diikuti untuk menghasilkan model blok awal tersebut ditampilkan dalam buku pegangan praktik kerja unggulan *Mengelola limbah tambang sulfida dan drainase asam (Managing sulphidic minewastes and acid drainage)* sebagai studi kasus pada tahun 1997.

Setelah pertambangan dimulai, resolusi lebih besar diperlukan untuk klasifikasi in-pit dari dapat diberikan oleh model DAL yang ada. Akibatnya, uji kerja yang lebih luas diselesaikan untuk menyempurnakan skema klasifikasi.

Sebuah program karakterisasi limbah selesai untuk memvalidasi skema klasifikasi in-pit. Tiga ratus sampel dari lubang bor berlian yang dipilih menggunakan logging visual dan dinilai oleh serangkaian uji statis dan kinetik. Pengaruh litologi dan perubahan pada kapasitas NAG juga ditangani. Hasil penelitian memperlihatkan korelasi antara kumpulan alterasi tertentu dan klasifikasi PAF. Sebuah subset dari jenis batuan sisa diidentifikasi untuk pengujian yang lebih menyeluruh. Jenis-jenis diidentifikasi sebagai berpotensi risiko DAL termasuk (pirit-serisit) kesalahan filik yang diubah, yang biasa memotong badan bijih.

Sebuah program yang disempurnakan berikutnya untuk mengoptimalkan metode yang akan digunakan untuk klasifikasi limbah selesai pada tahun 2002 meliputi lebih dari 200 sampel yang dikumpulkan dari empat pola ledakan, yang masing-masing bermuatan bahan yang telah diklasifikasikan berbasis PAF pada logging cut-off visual. Program menilai berbagai metode, termasuk potensi penggunaan uji lapangan pH NAG, sebagai alat untuk mengklasifikasi berjangka pendek.

Setelah mempertimbangkan hasil program ini, cut-off sulfur asli dari 0,35% dikonfirmasi untuk klasifikasi in-pit ARD. Cut-off sangat konservatif dan dipastikan agar semua PAF and sampel yang 'indeterminate' (tidak pasti) akan ditangkap oleh sistem klasifikasi dan dikelola sepantasnya. Ini berarti bahwa terdapat risiko rendah batuan sisa PAF yang salah penempatan dalam penumpukan batuan sisa NAF.

Mendukung pekerjaan karakterisasi geokimia in-pit, program kolom uji lindian kinetik dimulai pada tahun 1999. Lebih dari 50 kolom dijalankan selama masa program, termasuk 10 dari cadangan Ridgeway. Banyak kolom dijalankan hingga 10 tahun. Program kolom dikonfirmasi bahwa kesalahan filik merupakan sumber yang paling mungkin dari bahan PAF di Cadia Hill, dengan kondisi asam berkembang dalam kolom yang berisi bahan ini. Karena zona sesar ini cukup sempit, kebutuhan untuk menangkap bahan ini sebagai PAF, ditambah dengan ukuran blok minimum limbah yang dapat ditandai keluar untuk pertambangan, berarti ada 'dilusi' dari bahan PAF dengan batuan sisa bersih. Program kolom juga memperlihatkan bahwa bahan awalnya yang diklasifikasi sebagai NAF telah diidentifikasi dengan benar.

Menyempurnakan skema klasifikasi limbah

Sebuah program sampling WRD yang ada selesai pada tahun 2003 untuk secara forensik mengevaluasi geokimia setiap tumpukan (Williams et al. 2003). Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan klasifikasi jika di tempat itu terlalu konservatif dan memberikan data tambahan untuk menyempurnakan skema klasifikasi. WRD dibor dan sampel dikumpulkan dan dianalisis.

Program ini memperlihatkan bahwa praktik-praktik pengendalian bijih telah berhasil dalam menjaga bahan PAF keluar dari penumpukan batuan sisa NAF. Namun, seperti yang diantisipasi, konservatisme berarti bahwa bahan NAF yang lebih dari yang diperlukan sedang ditempatkan pada timbunan batuan sisa PAF (angka 1 dan 2). Berikutnya, skema klasifikasi baru diusulkan, dengan cut-off sulfur dari 0,5% untuk limbah PAF, yang merupakan dasar dari praktik lokasi ini.

Klasifikasi operasional dan pengelolaan limbah

Batuan sisa Cadia Hill diklasifikasikan menjadi tiga jenis limbah yang berbeda tergantung pada konten mineralisasi dan belerangnya. Tiga klasifikasi adalah Biru, Kuning/Hijau dan Merah Muda, mewakili limbah NAF, bijih berkadar rendah/limbah mineral dan limbah PAF. Jenis limbah adalah berkode warna untuk menyederhanakan operasi sehari-hari.

Salah satu hasil operasional penting dari program forensik penumpukan pengeboran yang diuraikan di atas adalah pelaksanaan pengujian limbah sulfur rutin (zona bijih dan mineral limbah sudah diuji untuk belerang selain untuk logam yang terseleksi). Impresi yang dihapus berkaitan dengan estimasi muatan sulfur visual dan memberikan data yang dapat digunakan untuk menghasilkan model DAL baru. Biaya menjalankan uji sulfur jauh diimbangi oleh penghematan yang diperoleh dengan mengurangi jumlah tonase limbah PAF (dan untuk kebutuhan enkapsulasi) diproduksi sebagai hasil pengenceran oleh bahan non-PAF. Perhitungan awal memberi kesan bahwa mengurangi tonase bahan PAF dengan hanya 2,5% akan membayar semua lubang-lubang ledak limbah untuk diuji (Williams et al. 2003).

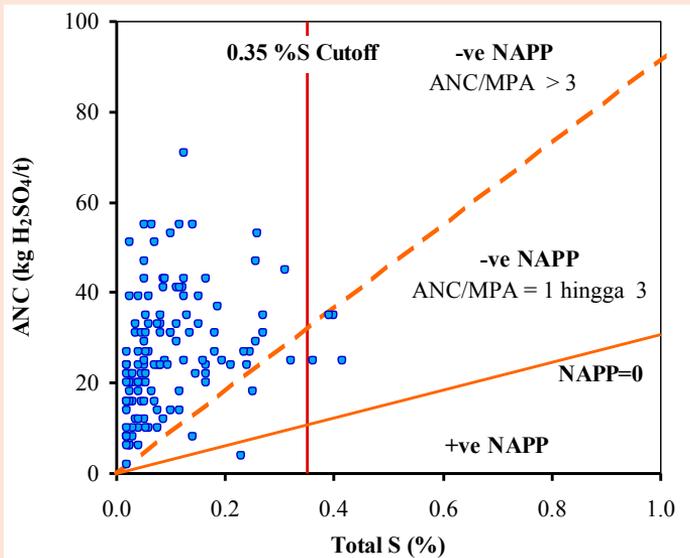
Batuan sisa dijadikan sampel dan diklasifikasikan berdasarkan muatan sulfur. Sebuah model potongan 0,5% kadar sulfur digunakan untuk mengidentifikasi bahan PAF, yang berasal dari uji kerja statis dan kinetik, sementara memperhitungkan bahan inheren ANC. Kadar sulfur untuk setiap blok diperkirakan oleh pemodelan spasial dari bahan limbah, menggunakan proses statistik yang dikenal sebagai kriging klasik (ordinary kriging). Kriging biasa menggunakan estimasi uji tertimbang berdasarkan grafik yang dikenal sebagai semi-variogram ageostatistik. Selain itu, di mana ada penyebab yang dapat dibuktikan secara geologi (misalnya, kesalahan identifikasi filik), bahan dengan sulfur cut-off rendah dapat diklasifikasi secara konservatif sebagai PAF.

Bijih berkadar rendah dan limbah mineral (yaitu, bahan Kuning dan Hijau) ditimbun sebagai bagian tak terpisahkan dari penumpukan batuan sisa selatan untuk potensi pengolahan masa depan. Batuan sisa Biru adalah sumber daya untuk bangunan dan baik digunakan atau ditimbun secara terpisah (Gambar 3). Limbah Merah Muda dienkapsulasi dengan kombinasi lapisan permeabilitas rendah, ditutupi oleh bahan limbah Biru and lapisan humus. Lapisan permeabilitas rendah dirancang untuk meminimalkan perkolasi bersih ke dalam WRD dan mencakup lapisan tanah liat yang dipadatkan (di lereng) dan politelin yang berkerapatan sangat tinggi (HDPE) pada bangku (Cadia Holdings Pty Ltd 2010, 2013).

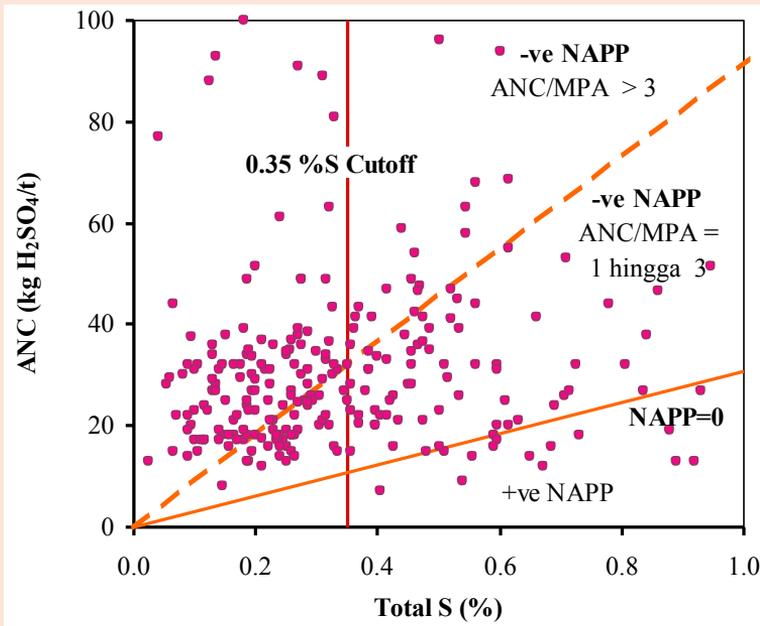
Antara tahun 2005 dan 2012, sekitar 39% batuan sisa yang dihasilkan dari pit Cadia Hill diklasifikasikan sebagai PAF (Cadia Holdings Pty Ltd, Laporan Pengelolaan Lingkungan Tahunan 2006-12, <http://www.newcrest.com.au/sustainability/environmental>).

Kesimpulan

Investasi dalam penyempurnaan skema klasifikasi limbah DAL asli selama periode lebih dari 10 tahun dan pelaksanaan uji sulfur rutin guna meningkatkan model blok untuk limbah tambang telah membayar dividen besar di lokasi ini. Penghematan yang diperoleh dengan mengurangi jumlah tonase limbah PAF (dan kebutuhan untuk enkapsulasi) diproduksi sebagai hasil pengenceran oleh bahan non-PAF telah jauh lebih tinggi dari biaya program karakterisasi. Presisi tinggi dalam mengklasifikasikan limbah telah memungkinkan bahan NAF yang lebih substansial yang akan dipisahkan untuk digunakan dalam encapsulasi bahan PAF dan ditimbun untuk penggunaan masa depan sebagai bahan penutup.



Gambar 1: Perhitungan asam-basa dari tumpukan batuan sisa NAF (Biru), memperlihatkan bahwa limbah NAF tengah diklasifikasi dan ditempatkan dengan benar. (Williams et al 2003)



Gambar 2: Perhitungan tumpukan batuan sisa PAF (merah muda) berbasis asam, memperlihatkan proposi signifikan limbah NAT (Williams et al. 2003)



Figure 3: Tumpukan batuan sisa di Operasi Cadia Valley, diwarnai sesuai jenis bahan (Cadia Holdings Pty Ltd 2014)

REFERENSI

Laporan pengelolaan lingkungan tahunan Cadia Holdings Pty Ltd (2006-2014)., Cadia Holdings, <http://www.newcrest.com.au/sustainability/environmental>.

Holliday, J, Wilson, A, Blevin, P, Tedder, I, Dunham, P, Pfitzner, M (2002). 'Porphyry gold-copper mineralisation in the Cadia district, eastern Lachlan Fold Belt, New South Wales, and its relationship to shoshonitic magmatism', *Mineralium Deposita*, 37:100-116.

Williams, DJ, Jeffery, J, Gilbert, L, Wilson, GW, Panidis, C, Perry, B (2003). 'A review of the acid rock drainage potential and hydrological implications of selectively-placed waste rock at a gold mine in NSW, Australia', Proceedings of the Sixth International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), 14-17 July 2003.

4.6 Penskalaan hasil uji laboratorium

4.6.1 Uji coba lapangan berskala pilot

Tujuan utama uji coba lapangan adalah untuk meningkatkan uji laboratorium agar lebih mencerminkan kondisi lokasi iklim dan penyebaran berukuran partikel dan untuk mengatasi beberapa keterbatasan uji skala-laboratorium, seperti jalur aliran preferensial melalui kolom lindian kinetik. Uji coba lapangan juga dapat digunakan untuk mengevaluasi efektivitas pilihan mitigasi yang diusulkan, khususnya penempatan selektif limbah, enkapsulasi, campuran reagen dan sistem penutup.

Skala uji coba yang umum terentang antara 1 hingga 3:

1. Uji pelindian lisimeter 'barrel and crib' (100–500 kg) (Gambar 16)
2. Alat-alat uji atau test pad (10 m x10 m x 3 m dan umumnya 500–1,000 ton) (Gambar 17)
3. Timbunan-timbunan pengujian (umumnya tinggi timbunan 15 hingga 20 m) dicobakan untuk memantau suhu, oksigen, hidrologi and rembesan kimiawi.²⁸

Gambar 16: Lisimeter uji pelindian di operasi tembaga-emas Phu Kham, Lao PDR, dioperasikan oleh Phu Bia Mining



Foto: Tim Rowles, Knight Piesold. Lihat studi kasus dalam Bagian 6.

28 Contoh diberikan oleh tambang berlian Diavik di Kanada (Blowes et al. 2006).

Gambar 17: Bantalan-bantalan uji yang dibangun di lokasi warisan Brukunga di South Australia



Foto: Earth Systems.

4.6.2 Uji coba lapangan dari skala besar sampai penuh

Uji coba lapangan dari skala besar sampai penuh yang dirancang dan dipantau dengan memungkinkan efektivitas tindakan pengendalian DAL untuk penentuan yang lebih andal, pengukuran kebutuhan untuk pengendalian tambahan, dan pembuktian kepatuhan terhadap persyaratan peraturan. Uji coba skala penuh jauh lebih rentan terhadap komplikasi dari yang ‘efek tepi’ atau jalur aliran preferensial yang biasanya terlihat di laboratorium atau pekerjaan berskala kecil. Sebagai tambahan, pengukuran berskala penuh dapat digunakan untuk menguji dan menyempurnakan model yang menggabungkan parameter yang diperoleh dari uji coba skala kecil, yang mengarah ke keyakinan yang lebih besar pada prediksi perilaku masa depan berbasis data yang diproduksi oleh uji skala yang lebih kecil.

Dalam melakukan percobaan ini, sangat penting untuk menyadari rentang waktu yang terkait dengan proses yang terjadi pada skala penuh. Misalnya, waktu respon dari tumpukan batuan sisa hingga ke perubahan pasokan oksigen yang dapat berjam-jam hingga berhari-hari. Di sisi lain, waktu yang dibutuhkan untuk perubahan laju pembentukan polutan pada tumpukan yang terdeteksi dalam sampel dari pemantauan air tanah juga dapat bertahun-tahun bahkan sampai puluhan tahun.²⁹ Mengingat konteks waktu ini, uji coba lapangan mungkin perlu diatur bertahun-tahun sebelum informasi tersebut akan dibutuhkan untuk desain dan implementasi, misalnya, strategi penutupan untuk mengurangi risiko produksi DAL dalam jangka panjang.

Tabel 7 memuat daftar pengukuran yang paling umum digunakan yang dilakukan dalam uji coba lapangan berskala penuh dan penjelasan singkat nilai-nilainya.³⁰

29 Pembahasan tentang rentang waktu yang terkait dengan proses DAL yang berbeda berskala penuh di tumpukan di Amos et al. (2015).

30 Contoh penyebaran instrumentasi tersebut dan penggunaan data yang diperoleh dalam Andrina (2009) dan Andrina et al. (2003, 2012) untuk tumpukan di tambang Grasberg di Indonesia; (Blowes et al 2006; Patterson et al 2006; Ritchie & Bennett 2003; Pearce & Bartheaux 2014).

Tabel 7: Pengukuran yang umum yang dilakukan dalam uji coba lapangan berskala besar hingga penuh

PENGUKURAN	METODE PENGUKURAN	KETERANGAN INFORMASI YANG DIPEROLEH	KETERANGAN
Profil konsentrasi oksigen gas pori	Sampling tabung dan portable gas analyser atau penyelidikan oksigen online yang diinstalasi dalam lubang-lubang bot atau selama konstruksi tumpukan	Lokasi bahan oksidasi; laju oksidasi; mekanisme pemindahan gas dominan	Memberikan informasi kualitatif dan kuantitatif yang baik; cepat menanggapi perubahan kondisi di tumpukan.
Profil suhu	String termistor diinstalasi di lubang-lubang bor selama konstruksi tumpukan	Lokasi bahan oksidasi; laju oksidasi	Memberikan informasi kualitatif yang baik namun sulit untuk diukur; respons yang lambat terhadap perubahan kondisi di tumpukan.
Tingkat infiltrasi air	Lisimeter	Tingkat pemindahan polutan lewat tumpukan; efektifitas sistem lapisan penutup	Perdebatan terus berlanjut atas desain dan interpretasi data; memakan waktu bertahun-tahun untuk mengumpulkan data yang berarti.
Komposisi kimiawi drainase	Piezometer sampling air permukaan dan air bawah tanah	Konsentrasi dan muatan polutan yang dilepaskan dari tumpukan	Data dalam jumlah besar; sangat lambat sebagai respons terhadap perubahan kondisi di timbunan.

Sementara protokol peralatan dan pengukuran relatif mudah, interpretasi data lapangan umumnya membutuhkan pemahaman ahli dari serangkaian proses yang rumit dan fisik kimia yang saling terkait.

4.7 Mengestimasi dan pemodelan laju pembentuk dan pelepas polutan

4.7.1 Ikhtisar

Tidak ada metode sederhana untuk ekstrapolasi hasil uji laboratorium untuk fasilitas pembendungan limbah tambang berskala besar untuk memprediksi konsentrasi zat terlarut yang akan diproduksi (Pearce et al. 2015). Meskipun masalah penentuan skala ini akhirnya dapat diatasi dengan temuan dari percobaan skala besar dari jenis yang dijelaskan di atas, percobaan tersebut mungkin memakan waktu bertahun-tahun untuk memproduksi hasil yang pasti. Dengan tidak adanya penentuan skala data, ada dua pendekatan yang saling melengkapi yang dapat diikuti untuk mengestimasi muatan zat terlarut (produk oksidasi/muatan kemasaman) yang dapat diproduksi dengan bahan-bahan tambang.

Pendekatan pertama menggunakan hasil empiris dari uji-uji statis dan kinetik untuk menyimpulkan luasan relatif pembentuk DAL dari berbagai domain di seluruh lokasi tambang. Informasi ini dapat menjadi amat sangat penting untuk mengidentifikasi bahan tambang berisiko tinggi dan untuk awalnya mengembangkan strategi pengelolaan DAL yang tepat.

Pendekatan kedua menggunakan model komputer dengan berbagai tingkat kecanggihan untuk mensimulasikan proses fisik dan kimia yang rumit yang terjadi dalam bahan tambang saat terpapar kondisi atmosferik. Tingkat proses bervariasi dengan posisi dan dari waktu ke waktu di fasilitas penampungan limbah. Ada juga mekanisme umpan balik di antara proses yang banyak tersebut, yang mengarah untuk menangkali perilaku sistem intuitif. Oleh karena itu model komputer perlu menyatakan dengan jelas asumsi dan mungkin harus sangat canggih untuk memprediksi perilaku DAL dengan tingkat keyakinan yang sama dengan yang disediakan oleh pendekatan empiris. Saat data pemantauan lapangan tersedia, model komputer harus dikalibrasi dan disempurnakan agar menghasilkan output prediksi yang lebih akurat dan dapat diandalkan dari waktu ke waktu.

4.7.2 Prediksi DAL menggunakan hasil uji empiris

Pendekatan yang berguna untuk memperkirakan laju pembentuk polusi dari sebuah lokasi, dan untuk memprioritaskan kemungkinan sumber-sumber DAL yang paling signifikan untuk pengelolaan, adalah menentukan laju pembentukan kemasaman atau 'muatan kemasaman' maksimal tahunan (H_2SO_4 ton per unit waktu) untuk setiap unit limbah atau domain tambang. Muatan kemasaman memberikan ukuran keseluruhan skala masalah DAL, karena mencakup asam (H^+) dan juga muatan kontaminan logam. Hal ini dapat dilakukan secara langsung berdasarkan tonase dan hasil dari uji geokimiawi statis bahan yang ditambang.

Hal ini dimungkinkan untuk mengestimasi kemungkinan laju pembentukan kemasaman tahunan maksimal bahan tambang massal ($\text{kg H}_2\text{SO}_4/\text{t}/\text{thn}$) menggunakan laju oksidasi pirit yang berlaku untuk bahan litologi atau jenis pelapukan (dinormalisasi untuk muatan sulfur, %berat FeS_2/thn) serta massa dan konten pirit rata-rata dari bahan massal tersebut.

Misalnya, jika 1 Mt batuan sisa dengan muatan pirit rata-rata 3% berat FeS_2 dan laju oksidasi pirit 0,5% berat FeS_2/thn benar-benar terpapar pada oksigen atmosfer, estimasi maksimal laju pembentukan kemasaman akan menjadi sekitar 250t $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{thn}$ untuk semua batuan sisa, atau 0,25 kg H_2SO_4 per ton batuan sisa setiap tahun.

Sementara tingkat maksimal *pembentukan* kemasaman relatif mudah untuk diperkirakan dengan cara ini, memprediksi tingkat pelepasan kemasaman lebih rumit, karena hanya sebagian dari batuan sisa di lokasi yang mungkin terpapar oksigen atmosfer. Tingkat pelepasan tergantung pada faktor-faktor seperti:

- kondisi iklim dan neraca air lokasi
- karakteristik hidrogeologi bahan tambang dan lingkungan sekitarnya
- proses pelapukan dan mineral-solusi geokimia yang rumit.

Tingkat proses pelapukan dan solusi-mineral geokimia bervariasi dengan posisi di tumpukan dan seiring waktu. Terdapat mekanisme umpan balik antara banyak proses, yang mengarah ke non-linear dan terkadang perilaku sistem yang berlawanan.

Seperti disebutkan di atas, pengukuran yang paling sederhana laju *pelepasan* polutan adalah muatan kemasaman (H_2SO_4 ton per unit waktu), yang dapat diperkirakan berdasarkan laju pembentukan polutan maksimal dikombinasikan dengan data iklim, neraca air lokasi dan hidrogeologi.

Saat laju pelepasan polutan diketahui, data kimia lindi dari uji kerja geokimia kinetik dapat kemudian digunakan untuk menyediakan estimasi indikatif (hitung-balik) memperlihatkan kualitas drainase/rembesan air dari berbagai domain lokasi.

4.7.3 Prediksi DAL menggunakan model komputer

Berbagai pendekatan pemodelan telah dikembangkan dengan tujuan simulasi berbagai rumit proses fisik dan kimia pendorong oksidasi serta geokimia solusi-mineral (Linklater et al 2005; Linklater et al 2006; Blowes & Frind 2003).

Model-model transport-reaktif dapat membantu dalam menyelidiki perilaku rumit pembentukan DAL, migrasi dan evolusi di lokasi tambang. Mereka perlu memperhitungkan oksidasi mineral sulfida, transportasi gas, transportasi panas, gerakan air dan zat terlarut, dan proses netralisasi yang melibatkan pemisahan karbonat-karbonat dan aluminosilikat. Model-model tersebut memerlukan input data spesifik lokasi, yang sering jarang atau kurang ditetapkan baik spasial (ruang) maupun temporal (waktu), setidaknya pada tahap awal kehidupan proyek. Model-model tersebut paling bermanfaat sebagai sarana untuk:

- menguji hipotesis-hipotesis dan skenario 'andaikan' untuk membandingkan relatif, bukan absolut, efektivitas strategi pengendalian DAL yang berbeda, jangka pendek dan jangka panjang
- menentukan kepekaan sistem tersebut terhadap input dan parameter desain tertentu
- membantu menginterpretasikan data pemantauan lapangan
- memberikan input yang tergantung waktu untuk menilai risiko ekologi yang mungkin ditimbulkan oleh pembuangan ke lingkungan air.

Banyak model transpor-reaktif yang telah dikembangkan, dengan berbagai kemampuan dan tingkat kerumitan. Ada yang mengambil pendekatan berurutan (sequential) (bukan berpasangan/non-coupled) di mana proses transportasi dan reaksi dipecahkan secara terpisah, baik dengan pengulangan di antara langkah-langkahnya maupun tidak. Model-model yang lain mengambil pendekatan satu langkah, di mana persamaan yang menguraikan transport fisik dan reaksi-reaksi geokimia dipecahkan secara gabungan.

Keakuratan prediksi model-model kualitas air yang rumit sering dibatasi oleh kualitas data input dan ketidakpastian atau kerumitan yang terkait dengan pemodelan proses geokimia rumit. Namun demikian, beberapa model berpotensi untuk membantu keputusan pengelolaan tingkat tinggi jika analisis sensitivitas dilakukan dengan tepat, jika digabungkan dengan pengetahuan pembentukan polutan dan estimasi tingkat pelepasan dari metode-metode uji kinetik seperti yang diuraikan di atas, atau pun keduanya.

Namun, mungkin tidak perlu menggunakan model transpor-reaktif yang rumit untuk memprediksi kemungkinan efektivitas berbagai strategi pengendalian DAL, terutama untuk bahan segar yang belum teroksidasi secara signifikan. Karena oksigen dan air merupakan dua reaktan eksogen yang harus ada untuk pembentukan oksidasi sulfida, model yang mampu memprediksi tingkat oksigen dan masuknya air ke dalam batuan sisa dan tailing dapat memberikan semua yang diperlukan untuk membandingkan efektivitas strategi-strategi pengelolaan alternatif. Misalnya, dalam kasus butiran halus tailing, mempertahankan saturasi air di atas 85% sebagian besar akan menghilangkan oksidasi (Bussière 2007).

Demikian juga, mempertahankan tingkat kejenuhan yang sama dalam lapisan tanah liat berbutir halus yang merupakan bagian dari limbah lapisan penutup batuan akan mencegah masuknya oksigen dan dengan demikian meminimalkan pembentukan DAL. Fungsi lapisan penutup simpan/lepas adalah meminimalkan jumlah infiltrasi bersih dan karenanya jumlah air yang tersedia untuk produk reaksi transpor. Oleh karena itu, model yang dapat memprediksi neraca air di bawah kondisi aliran tak jenuh akan memungkinkan penilaian kinerja sistem penutup tersebut.

Model yang telah digunakan untuk memprediksi aspek yang beragam dari proses pembentukan DAL didokumentasikan dalam Bagian 5 dari Pedoman GARD (lihat Glosarium). Saat memilih model untuk digunakan, tiga pertanyaan tingkat tinggi dan masalah-masalah yang harus dipertimbangkan:

1. Apakah model telah banyak digunakan dan diuji/divalidasi?
2. Apakah regulator memiliki preferensi untuk model atau model tertentu, berdasarkan karena terbiasa dan pengalaman in-house?
3. Sementara kode pemodelan kepemilikan mungkin secara teknis masuk akal, mereka tidak mungkin dapat diakses untuk ditinjau oleh regulator atau pihak ketiga yang independen.

5.0 MENILAI RISIKO YANG TERPAPAR OLEH DAL

Pesan-pesan kunci

- DAL dapat menimbulkan risiko substansial yang berpotensi biaya yang sangat besar jika tidak diidentifikasi sejak awal dikelola dengan tepat.
- Risiko dapat mencakup lingkungan, kesehatan manusia, keuangan, regulasi dan reputasi.
- Sebuah strategi pengelolaan risiko yang berguna adalah untuk menyusun peringkat potensi bahaya AMD dan kemudian mengembangkan protokol untuk pengelolaannya.
- Pelestarian nilai-nilai lingkungan yang disepakati adalah prinsip utama yang mendorong pengelolaan DAL.

Penilaian keseluruhan risiko proyek adalah topik yang lebih luas daripada yang dapat dibahas dalam buku ini, dan diperlakukan secara rinci di tempat lain.³¹ Namun, sejarah dan pengalaman dalam industri pertambangan global telah memperlihatkan bahwa DAL dapat menjadi risiko substansial dan berprioritas tinggi dengan potensi kerusakan reputasi dan biaya besar yang terjadi jika tidak diidentifikasi sejak awal dan dikelola dengan tepat.³²

Di Australia, seperti di negara-negara lain, hukum tata kelola perusahaan mengharuskan perusahaan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi dan mengelola semua risiko yang signifikan yang dihadapinya. Sebuah pendekatan yang bijaksana adalah untuk mengembangkan program tinjauan risiko DAL terfokus yang dimulai dengan mengajukan dua pertanyaan utama:

- Bahaya DAL apakah yang dihadapi oleh operator tambang?
- Apakah operator mengelola bahaya tersebut untuk meminimalkan lingkungan, kesehatan manusia, keuangan, peraturan dan risiko reputasi?

Banyak perusahaan pertambangan menilai risiko yang ditimbulkan oleh DAL sebagai bagian dari pengembangan proyek dan sebagai bagian dari perencanaan penutupan. Namun, ada beberapa contoh yang diterbitkan dari proses yang digunakan untuk penilaian tersebut.

Kinross Gold Corporation di Amerika Serikat menggabungkan hasil uji kerja geokimia DAL ke dalam proses perencanaan tambang G4nya (Williams et al. 2015). Proses G4 mengintegrasikan data aliran geologi, geokimia, geometalurgis dan geoteknik menjadi sumber daya pemodelan blok untuk mengoptimalkan cadangan yang tersedia dan untuk meminimalkan risiko DAL.

Rio Tinto menggunakan pendekatan penilaian risiko DAL perusahaan yang dijelaskan dalam Bagian 5.1 untuk mengidentifikasi risiko (studi kasus pada bagian tersebut memperlihatkan bagaimana), untuk menilai proyek-proyek yang ada dan untuk membantu merancang proyek-proyek baru sehingga generasi tambang berikutnya memiliki kesempatan terbaik untuk mengelola DAL secara efektif dan berkontribusi pada pembangunan ekonomi berkelanjutan.

³¹ Lihat buku pegangan praktik kerja unggulan *Manajemen risiko* (DIES 2016f).

³² Teknik-teknik untuk mengidentifikasi potensi DAL dan besarnya kemungkinan dijelaskan dalam Bagian 4.

Dalam menggambarkan hasil peninjauan Rio Tinto terhadap risiko DAL, Richards et al. (2006) membuat poin penting bahwa mematuhi peraturan pemerintah dan kondisi perizinan tidak harus menjamin bahwa DAL telah dikelola dengan cara yang paling praktis, kuat dan hemat biaya. Tinjauan Rio Tinto menyorot beberapa jenis masalah yang biasanya tidak cukup ditangani, menghasilkan tingkat risiko yang lebih tinggi daripada sebelumnya yang telah diasumsikan. Sangat mungkin bahwa permasalahan tersebut membutuhkan lebih banyak perhatian manajemen di seluruh industri pertambangan. Permasalahan tersebut adalah :

- karakterisasi geokimia bahan
- pemantauan potensi dampak air tanah
- pengelolaan dampak air tanah
- pemilahan batuan sisa
- desain lapisan penutup
- pembanjiran tempat kerja.

Mengingat berbagai masalah yang perlu ditangani dalam menilai risiko DAL, perusahaan pertambangan biasanya membutuhkan jasa ahli di lapangan, setidaknya untuk pengulangan pertama, guna memastikan agar semua aspek utama risiko diidentifikasi dan diperhitungkan dengan tepat.

5.1 Risiko dan kewajiban—pelajaran dari tinjauan perusahaan

Pada tahun 2003, Rio Tinto memulai program pengkajian risiko DAL yang mencakup semua operasinya. Pada tahun 2006, Richards et al. (2006) menggambarkan metode yang dikembangkan untuk ulasan dan melaporkan temuan-temuan utama dari penerapannya selama dua tahun pertama. Pendekatan yang digunakan dan pelajaran dari program ini masih relevan dan dapat diterapkan pada perusahaan pertambangan dari berbagai ukuran, yang mengarah ke hasil pembangunan yang berkelanjutan yang positif.

Rio Tinto menggunakan pendekatan dua tahap. Pertama melibatkan pengembangan protokol penyaringan bahaya untuk peringkat potensi bahaya DAL yang ditimbulkan oleh operasi pertambangan tertentu, berdasarkan pengaturan fisik dan kimia lokasi. Masalah luas diperiksa sebagai bagian dari penilaian ditugaskan nilai-nilai (bobot) numerik yang digabungkan menjadi skor bahaya akhir. Seperti yang diperlihatkan pada Tabel 8, permasalahan yang geologi (45%), risiko DAL yang baru saja mulai (5%), skala gangguan (25%), jalur transportasi (10%) dan sensitivitas penerima lingkungan (15%).

Tahap kedua melibatkan penerapan protokol untuk menilai seberapa efektif operasi itu mengelola bahaya DAL dan bagaimana hal itu mengurangi risiko secara keseluruhan. Untuk meminimalkan kewajiban masa depan, protokol mengidentifikasi permasalahan laten maupun yang tengah berjalan. Hal ini memberikan perhatian khusus kepada implikasi jangka panjang strategi dan praktik manajemen.

Protokol peninjauan risiko memeriksa 11 bidang kinerja utama yang meliputi semua aspek pengelolaan DAL yang sukses (Tabel 9). Seperti dalam prosedur penyaringan, unsur-unsur individu digabung menjadi pendekatan holistik untuk karakterisasi dan pengelolaan DAL. Penilaian tersebut harus diterapkan untuk semua bahan pasir lokasi, termasuk batuan sisa, dinding pit, tailing, dan bahan konstruksi yang berasal dari limbah yang bermuatan sulfida.

Tabel 8: Faktor-faktor yang digunakan dalam protokol penyaringan bahaya Rio Tinto

MASALAH LUAS	FAKTOR	BERAT
Geologi	Jenis cadangan bijih	30%
	Potensi netralisasi batuan di tempat dan negeri	10%
	Masalah DAL yang diketahui di lokasi	5%
Risiko DAL yang baru mulai	Waktu sejak perubahan pengoperasian besar terakhir	5%
Besarnya gangguan	Jumlah limbah yang disimpan di lokasi	15%
	Jejak area yang terganggu	10%
Jalur-jalur transportasi	Ketersediaan air	7%
	Pelepasan logam ke lingkungan ^a	3%
Lingkungan penerima	Kedekatan badan air permukaan	5%
	Kebasaan badan air atau air tanah	5%
	Kedekatan area yang dilindungi atau tidak berpenghuni	5%

^a Aliran larutan logam dilepaskan ke lingkungan melalui titik-titik pembuangan yang diizinkan dan praktik operasi yang telah disetujui.
Sumber: Richards et al. (2006).

Tabel 9: Daerah kinerja utama dan unsur-unsur yang digunakan dalam Rio Tinto serta protokol ulasan risiko

AREA KINERJA UTAMA	ELEMEN/UNSUR
Karakterisasi berbasis lokasi	Karakterisasi limbah tambang yang ada
	Iklim
	Hidrologi dan hidrogeologi
	Kimia air permukaan dan air bawah tanah
Karakterisasi bahan limbah dan dinding batuan	Karakterisasi ekosistem
	Tata letak geologis
	Karakterisasi geokimiawi massa batuan dan limbah proses
	Geokimiawi DAL dari dinding pit dan tempat kerja
Pengelolaan bahan-bahan	Karakteristik fisik limbah
	Integrasi karakteristik DAL ke dalam perencanaan tambang
	Desain fasilitas pembuangan limbah
Proses-proses pembentukan DAL	Pengelolaan bahan limbah
	Oksidasi sulfida
	Transportasi oksigen
	Produk-produk oksidasi dan reaksi kimia di tempat
	Infiltrasi dan gerakan air internal

AREA KINERJA UTAMA	ELEMEN/UNSUR
Jalur-jalur migrasi dan aliran DAL	Pelepasan air permukaan dan pemuatan kontaminan
	Aliran air bawah tanah dan aliran kontaminan
Lingkungan berpotensi penerima	Kapasitas asimilatif lingkungan penerima
	Kepekaan ekologis lingkungan penerima
Pemahaman konseptual terpadu	Model-model konseptual
	Model-model nomor
	Pengembangan kinerja dan kriteria penutupan
Program mitigasi DAL	Strategi mitigasi
	Implementasi strategi mitigasi
Pemantauan dan penilaian berkesinambungan	Strategi pemantauan
	Pengelolaan dan penilaian data
	Mekanisme umpan balik untuk pengelolaan
Keterampilan manajemen dan sumber daya	Kewajiban dan peran yang jelas
	Prosedur yang dilembagakan dan pengelolaan informasi
	Penyediaan sumber daya
Hubungan pemangku kepentingan	Hubungan pemangku kepentingan

Sumber: Richards et al. (2006).

Protokol penyaringan Rio Tinto kini telah diterapkan untuk semua usaha serta semua potensi proyek. Protokol juga dapat diterapkan untuk akuisisi potensial untuk menilai tingkat risiko kontingen yang ditimbulkan oleh DAL. Hanya lokasi-lokasi dengan penilaian DAL rendah yang tidak dikaji secara rinci.

Protokol itu kini juga telah diadaptasi untuk digunakan pada operasi Pilbara Rio Tinto. Green dan Borden (2011) mencatat potensi untuk bahan sulfida yang akan terpapar oleh pertambangan di lokasi tersebut (seperti yang didokumentasikan dalam studi kasus 4). Untuk operasi tersebut, proses empat tahap telah dikembangkan dan masing-masing dari dua tahap yang telah diidentifikasi untuk menjelaskan keadaan tertentu di lokasi. Protokol penyaringan bahaya awal melibatkan penilaian awal dan rinci, sedangkan proses penilaian risiko berikut ini melibatkan penilaian dari strategi teknis dan manajemen.

Studi kasus 4: Pengelolaan limbah shale (endapan batuan liat) PAF berdasarkan kerangka kerja penilaian risiko Dal Rio Tinto Iron Ore, wilayah Pilbara, Western Australia

Konteks

DAL, serta masalah pembakaran spontan, yang diketahui terkait dengan cadangan bijih besi yang ditambang di Hamersley Province, Western Australia. Limbah bahan-bahan yang bermuatan karbonat dan yang mengandung sulfida (pirit shale hitam dan lignit) merupakan paparan risiko DAL dan pembakaran spontan.

Pengelolaan serpih hitam pirit dan lignit di semua lokasi Rio Tinto Iron Ore (RTIO) di Hamersley Province, dilakukan sesuai dengan rencana pengelolaan spontan drainase pembakaran dan asam batuan (spontaneous combustion and acid rock drainage (scard)). Strategi manajemen rencana ini secara luas berdasarkan prinsip-prinsip berikut:

- identifikasi bahaya dan risiko hasilnya terhadap lingkungan
- identifikasi peluang untuk mengelola atau menghindari DAL sebelum pertambangan daerah dimulai
- penyediaan basis secara ketat untuk pengambilan keputusan dan perencanaan
- evaluasi dan prioritas risiko dan identifikasi langkah-langkah manajemen untuk mengurangi risiko
- pengurangan risiko dan biaya operasional
- peningkatan penelitian uji kelayakan, pemerintahan, hubungan pemangku kepentingan dan reputasi bisnis
- minimalisasi jangka panjang risiko pasca-penutupan, kewajiban dan dampak lingkungan.

Strategi pengelolaan DAL

RTIO telah memulai rinci strategi mitigasi dan pengelolaan DAL yang bertujuan melestarikan nilai-nilai lingkungan dari sumber daya air regional. Strategi tersebut mencakup aspek-aspek sebagai berikut:

- kuantifikasi latar belakang dan kualitas air permukaan dan potensi pelepasan kontaminan ke air tanah dari masing-masing fasilitas limbah
- pemantauan air tanah dan penentuan pola aliran air tanah dan transportasi bulk
- karakterisasi geokimia dari serpih hitam pirit, lignit dan satuan batuan yang ditambang lainnya
- evaluasi berjangka tumpukan batuan sisa dan sumber dinding pit dari karakterisasi di lokasi maupun di luar lokasi
- optimisasi dari desain lapisan penutup melalui pemodelan dan pemantauan sistem penutup percobaan strategi-strategi penumpukan batuan dan limbah di masa depan guna meminimalkan risiko DAL secara keseluruhan.

Pelestarian nilai-nilai lingkungan membutuhkan pengetahuan tentang variabilitas latar belakang alam sumber-sumber daya air, serta bagaimana air tersebut digunakan secara regional. Program pengelolaan DAL bertujuan untuk mengkuantifikasi potensi pelepasan kontaminan ke dalam tanah atau air permukaan dan penerapan strategi mitigasi, jika perlu, untuk mengurangi risiko terhadap nilai-nilai lingkungan.

RTIO memiliki pedoman untuk menetapkan risiko sulfida dalam model blok geologi (Green dan Borden2011). Lima tingkat risiko yang ditugaskan. Kategori risiko 0 memperlihatkan bahwa bahan tersebut tidak menimbulkan risiko; kategori 1 bahan limbah memiliki risiko rendah untuk DAL; kategori 2 memiliki risiko rendah hingga sedang; Kategori 3 memiliki risiko tinggi DAL dan potensi pembakaran spontan; dan kategori 4 berisi bahan penetral. Serpih hitam pirit dengan muatan sulfur yang tinggi dan lignit ditugaskan untuk kategori 3.

Potensi bahan DAL dinilai dari pengukuran laju oksidasi intrinsik, neraca asam basa dan studi kolom kinetik. Pada satu lokasi, berbagai pengukuran in situ juga telah dilakukan di tumpukan batuan sisa. Pengukuran ini digunakan untuk mengkuantifikasi potensi pembentukan dan pelepasan kontaminan setiap fasilitas limbah.

Model air bawah tanah dikembangkan untuk lokasi yang menambang di bawah lapisan air tanah. Model dapat digunakan untuk menilai pengaruh rongga (void) pit akhir pada gerakan air tanah dalam akuifer daerah dan apakah lokasi tambang berpotensi untuk mempengaruhi reseptor air (seperti badan air permukaan tetap dan ekstraksi air bor yang digunakan untuk ternak) di wilayah tersebut.

Kesimpulan

Pengelolaan limbah mineral pada operasi RTIO Pilbara melibatkan pendekatan terpadu. Kewajiban dan tindakan untuk semua kelompok yang bekerja dengan limbah sulfida (serpih hitam dan lignit) diuraikan dengan jelas dalam rencana pengelolaan. Pelaksanaan rencana di setiap operasi berkisar dari karakterisasi awal dan pemodelan melalui pengembangan proyek, perencanaan tambang, produksi dan penutupan. Tujuan perencanaan tidak hanya untuk mengukur risiko terhadap nilai-nilai lingkungan tetapi untuk mengurangi potensi terjadinya risiko.



Gambar 1: Zona footwall (kiri) ke shale (hitam piritik) Mount McRae (kanan)

REFERENSI

Green, R, Borden, RK (2011). 'Geochemical risk assessment process for Rio Tinto's Pilbara iron ore mines', in Kumar, S (ed), *Integrated waste management*, volume I, ISBN: 978-953-307-469-6, InTech, <http://www.intechopen.com/books/integrated-waste-management-volume-i/geochemical-risk-assessment-process-for-rio-tinto-s-pilbara-iron-ore-mines>.

5.2 Risiko DAL di lokasi-lokasi brownfield

Lokasi-lokasi brownfield adalah lokasi-lokasi yang sebelumnya telah ditambang dan yang diaktifkan oleh pemilik asli setelah periode perawatan dan pemeliharaan, ataupun sedang dinilai ulang secara ekonomi atau dioperasikan setelah diakuisisi oleh pemilik baru. Profil risiko DAL lokasi tersebut dapat dinilai dengan menerapkan jenis protokol yang dijelaskan di atas. Namun, dalam kasus lokasi yang belum dioperasikan selama bertahun-tahun, dan di mana oksidasi substansial limbah yang ditambang mungkin terjadi, perawatan ekstra perlu diambil dengan metode karakterisasi geokimia (Bagian 4) yang digunakan untuk mengukur sejauh mana risiko dan langkah-langkah mitigasi yang mungkin diperlukan.

Selain masalah teknis yang perlu diselesaikan untuk memulai kembali penambangan dan pengolahan mineral, para regulator dan operator baru sering membahas bagaimana warisan masa lalu harus diatasi. Hal ini paling sering terjadi dalam konteks tanggung jawab untuk mengelola limbah dan dampak DAL yang ada pada lingkungan penerima. Resolusi mungkin jelas saat operator baru bertanggung jawab penuh untuk warisan, setelah menyumbang biaya dalam penilaian kelayakan pra-akuisisi. Namun, dalam beberapa kasus pendekatan bersama atau koperasi untuk mengatasi warisan dapat dinilai untuk menjadi yang terbaik dari hasil perspektif pembangunan berkelanjutan. Studi kasus 5 adalah contoh bagaimana kolaborasi antara negara dan perusahaan pertambangan telah memungkinkan kelanjutan yang menguntungkan produksi pertambangan, ditambah dengan manajemen yang efektif dari warisan DAL, di sebuah lokasi yang jika tidak demikian dapat sebaliknya telah diremediasi dengan sumber daya bagi negara.

Studi kasus 5: Kemitraan publik—swasta untuk memfasilitasi operasi ekonomi yang sedang berlangsung dan untuk meningkatkan prospek penutupan untuk lokasi brownfield, Savage River Mine, Tasmania

Konteks

Tambang magnetit Savage River (Gambar 1) dan pabrik pengolahan pelet Port Latta (70km jauh di pantai) di Tasmania telah memproduksi hampir terus menerus sejak tahun 1967.



Gambar 1: Peta lokasi memperlihatkan lokasi-lokasi utama

Lokasi ini dioperasikan oleh Pickands Mather International sejak tahun 1967 hingga tambang ditutup pada awal tahun 1997. Tambang dikembalikan kepada pemerintah Negara Bagian dalam bulan Maret 1997, bersama-sama dengan jaminan bond rehabilitasi sebesar \$11,4 juta. Lokasi dibuka kembali pada akhir tahun 1997 di bawah manajemen Mineral Bulk Australia (ABM) dan sejak itu telah beroperasi terus menerus, dengan ABM bergabung (merger) dengan Grange Resources Limited dalam bulan Januari 2009.

Pickands Mather International meninggalkan warisan lingkungan yang signifikan. Pada akhir tahun 1996, dua sungai yang melintasi hak sewa pertambangan, Savage River dan Main Creek, mengalami dampak negatif akibat penambangan. DAL dari sejarah WRD dan bendungan tailing tua merupakan sumber utama dampak kualitas air di Savage River. Data pemantauan memperlihatkan konsentrasi logam yang tinggi dalam Savage River sepanjang 30km hilir dari lokasi tambang. Median konsentrasi tembaga hanya hilir lokasi tambang yang pada waktu itu lebih dari 25 kali ANZECC-ARMCANZ (1992) direkomendasikan nilai untuk perairan lunak, dengan konsentrasi tembaga maksimal 3-5 kali lebih tinggi dari konsentrasi median.

Tengara Goldamere Act diberlakukan oleh Pemerintah Tasmania untuk menyediakan operator baru Tambang Savage River dengan ganti rugi terhadap DAL yang sudah ada. Perjanjian Goldamere menetapkan syarat dan kondisi dari penjualan lokasi (dari pemerintah Negara Bagian kepada ABM), dengan harga pembelian yang disepakati yang harus dibayarkan melalui penerapan dalam bentuk rehabilitasi lingkungan kerja senilai \$13 juta, menargetkan DAL warisan. Pekerjaan remediasi yang akan dilakukan telah disepakati oleh ABM maupun Crown. Program Rehabilitasi Savage River (Savage River Rehabilitation Program (SRRP)) dibentuk untuk mengawasi proses ini. Kelompok pengawas operasi SRRP terdiri dari perwakilan Grange, Instansi Perlindungan Lingkungan (Environment Protection Authority (EPA)) Negara Bagian dan Sumber Daya Mineral Tasmania. Tujuan SRRP adalah:

Remediasi jangka panjang semaksimal mungkin dari kerusakan lingkungan yang dihasilkan dari operasi pra-1997 di tambang Savage River, dengan fokus utama pada pemulihan lingkungan air hilir lokasi tambang.

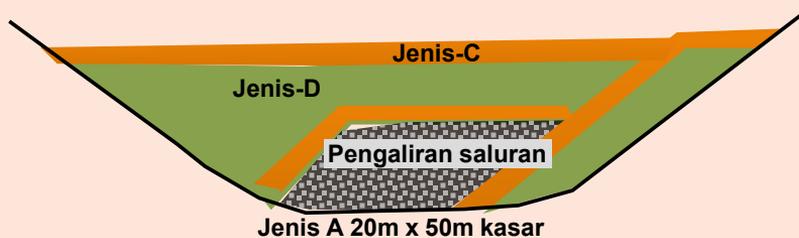
Pekerjaan pengelolaan DAL di lokasi

Untuk mencapai tujuan SRRP proyek berikut telah dilakukan (Kent 2008):

- pengolahan air pasif terpusat, sebelum dilepaskan dari supernatan yang telah diolah ke Savage River, di sebelah selatan pit lensa (Gambar 1, tengah), menggunakan air alkali yang diproduksi di pit aktif utara dari hancuran pasif kalsium klorit sekis oleh truk angkut dan terlindi air hujan
- pembangunan jaringan pipa untuk mengalihkan dan memproses DAL
- penempatan lapisan penutup penepisan air, penutup tanah liat dipadatkan di atas tempat penumpukan D untuk mengurangi limpasan dan rembesan produksi DAL, dengan penamangan (armouring) dari sisi pembuangan dengan jaring batuan pembentuk-basa untuk menghasilkan kebasaaan tambahan
- pengembangan saluran pengaliran (flow though) alkaline (dijelaskan di bawah)
- perlakuan pasif rembesan asam menggunakan tailing basa.

WRD Broderick Creek adalah tempat penimbunan aktif utama. Konstruksi dimulai pada pertengahan tahun 80-an. Tempat penimbunan sedang dibangun melalui saluran sungai yang ada yang secara progresif dikonversi ke sistem pengaliran saluran A, sistem pembentuk-alkalin sebelum penempatan batuan sisa PAF (jenis-D; Gambar 2). Hal ini dicapai dengan tipping blockey, batuan sisa pembentuk alkalin bersih ke sungai dan memungkinkan bahan yang lebih besar untuk meluncur (rill) ke bawah. Air sungai kecil melewati batuan sisa yang ditempatkan ini mengangkut kebasaaan dan mengirimkan ke Savage River. Konsentrasi kebasaaan dalam arus keluar telah meningkat dari sekitar 70-250 mg/L seiring dengan meningkatnya ukuran timbunan, dan seiring bertambahnya panjang jalan dari sistem pengaliran saluran. Seperti lensa selatan, kebasaaan ini memberikan kontribusi untuk menetralkan sumber DAL tersisa yang cepat hilang dalam Savage River.

Informasi tambahan tentang karakterisasi bahan dan pembangunan tempat timbunan batuan sisa dan sistem penutup terdapat dalam Hutchison and Brett (2006).



Gambar 2: Pengaliran saluran Broderick Creek: Penampang yang disederhanakan memperlihatkan jenis-A: batuan sisa pembentuk butiran kasar alkalin, Jenis-C: batuan sisa liat lapuk, dan Jenis-D: batuan sisa PAF terenkapsulasi

Pemantauan kinerja

Seperti diperlihatkan dalam Gambar 3, pekerjaan perbaikan yang dilakukan sejak tahun 1997 telah secara substansial mengurangi konsentrasi tembaga seiring waktu di Savage River langsung hilir tambang (SRbSWRD pada Gambar 3 dan Gambar 4) dan hilir di dekat pertemuan Savage River dengan Pieman River (SRaSR dalam Gambar 3). Perhatikan sumbu konsentrasi logaritmik yang telah digunakan pada Gambar 3 sehingga rentang konsentrasi di empat lokasi dapat dibandingkan.

Terutama, pengalihan kurasan timbunan limbah sebelah utara telah mengalami penurunan besar dalam hulu tembaga dari tambang (SRaPS dalam Gambar 3).

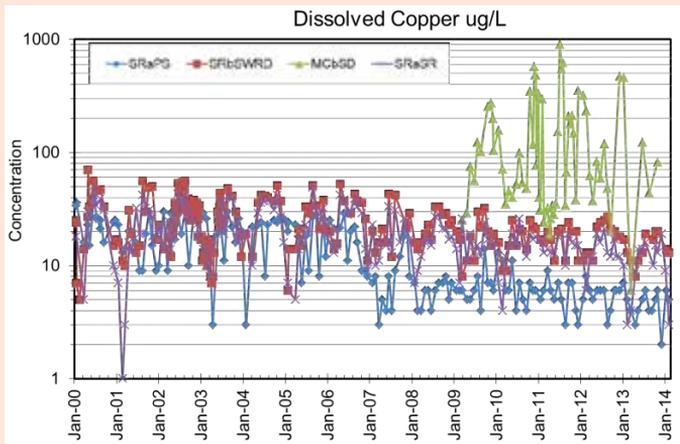
Pada tahun 2012–13, median konsentrasi tembaga di dalam Savage River langsung hilir tambang pada pertemuan Savage River dengan Pieman River adalah 26 mg/L. Ini merupakan penurunan lima kali lipat dalam konsentrasi tembaga sejak awal program remediasi, yang merupakan prestasi substansial. Namun, median konsentrasi tembaga masih lima kali nilai picu untuk perlindungan spesies air pada tingkat 99% untuk air keras (ANZECC-ARMCANZ 2000), memperlihatkan kebutuhan untuk lebih banyak pekerjaan yang harus dilakukan.

Uji kerja toksikologi lokasi spesifik selesai pada tahun 2001 dan 2002 menemukan bahwa toksisitas tembaga berkurang oleh kehadiran kalsium dan kebasaan dalam air Savage River. Pekerjaan menetapkan tingkat target tembaga pada rentang tingkat kalsium, dan mengidentifikasi dua toksisitas target—satu yang cukup untuk melindungi ikan dan fauna akuatik kuat lainnya, dan yang lain akan melindungi invertebrata air yang lebih sensitif. Sejak tahun 2012, kedua target toksisitas ini telah secara konsisten terpenuhi (Gambar 4), memperlihatkan efektivitas pekerjaan remediasi dalam mengurangi masukan DAL langsung ke sungai hilir lokasi tambang. Keberhasilan dalam memenuhi target toksisitas ini dan perbaikan umum di sungai lebih lanjut telah diperlihatkan lewat penilaian biologis independen Savage River.

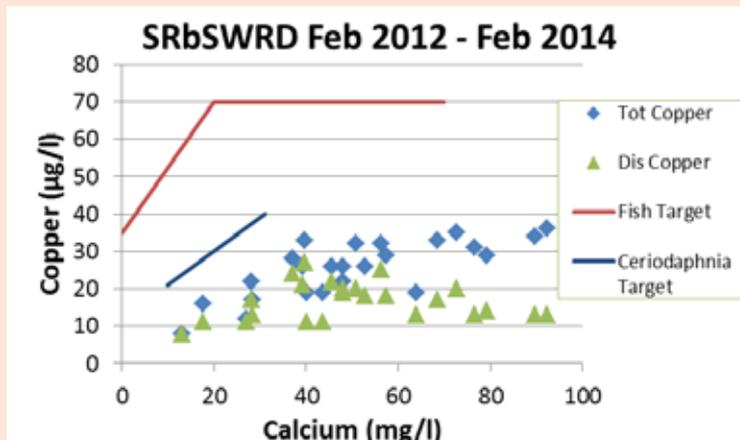
Rincian lebih lanjut dari pekerjaan yang telah dilakukan untuk mengelola permasalahan AMD di lokasi dan meningkatkan kualitas air hilir terdapat dalam tinjauan komprehensif baru-baru ini (Williams et al. 2014).

Perbaikan yang berkesinambungan

Pembangunan masa depan fasilitas tailing baru di Main Creek, selatan dari bendungan tailing Main Creek saat ini, akan menangkap dan menetralkan rembesan dari timbunan-D serta menyediakan SRRP kesempatan untuk melanjutkan netralisasi pasif muatan kemasaman dan logam yang dihasilkan dari bendungan tailing tua untuk lebih 20 tahun. Fasilitas tailing baru juga akan menampilkan sistem filter nominal dan saluran aliran alkalin yang akan memungkinkan untuk air melewati dinding bendungan dan mengangkut kebasaaan lebih lanjut untuk ditambahkan ke Main Creek.



Gambar 3: Konsentrasi tembaga di lokasi utama sejak bulan Januari 2000.



Gambar 4: Perbandingan konsentrasi tembaga total dan terlarut di Savage River di barat daya penimbunan batuan sisa dengan target toksikologi spesifik lokasi. SRbSWRD=Savage River langsung hilir tambang

Kesimpulan

Setelah pelaksanaan Perjanjian Goldamere, hubungan antara Negara Bagian dan Grange (dulunya ABM) tidak selalu mulus. Hari-hari awal memberikan tantangan yang signifikan, dengan ketidakpercayaan, konflik dan pertimbangan nilai yang berbeda-beda yang berasal dari para pihak. Grange harus mendapatkan kepercayaan dengan membuktikan dirinya untuk menjadi operator lingkungan yang baik. Dalam melaksanakan hal itu Grange telah menuai manfaat dari Perjanjian Goldamere, telah membentuk hubungan jangka panjang yang sehat dengan pemerintah, dan telah membuat pengenalan kemitraan ekuitas dan pemilik bisnis baru secara signifikan lebih mudah karena kewajiban lingkungan yang potensial dapat digambarkan sebagai aset untuk bisnis. Operasi-operasi yang ramah lingkungan juga membuat perekrutan profesional muda jauh lebih mudah dalam dunia sumber daya manusia yang kompetitif (Kent 2008).

Negara Bagian juga telah mendapatkan banyak manfaat. Dari dana remediasi asli sebesar \$23.400.000 (termasuk \$13 juta yang diberikan oleh Pickands Mather International), sekitar \$20 juta masih tersedia pekerjaan/pengolahan masa mendatang saat lokasi akhirnya tutup. Sementara itu, sebagian besar warisan DAL telah diperlakukan atau terus pasif ditanggulangi, meningkatkan prospek bahwa Savage River akhirnya dapat berhasil direhabilitasi dan lokasi diserahkan kembali ke Negara Bagian.

REFERENSI

ANZECC (Australian and New Zealand Environment and Conservation Council) (1992). *Australian water quality guidelines for fresh and marine waters*, National Water Quality Management Strategy Paper No. 4, ANZECC, Canberra.

ANZECC-ARMCANZ (Australian and New Zealand Environment and Conservation Council and Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand) (2000). *Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality: volume 1: the guidelines*, chapters 1-7, ANZECC and ARMCANZ, Canberra.

Hutchison, BJ, Brett, D (2006). 'Savage River Mine: practical remediation works', pp. 810-819 in Barnhisel, RI (ed), *Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, 26-30 March 2006, St Louis MO, American Society of Mining and Reclamation (ASMR), 3134 Montavesta Road, Lexington, KY 40502.

Kent, SB (2008). 'Innovative ARD management unleashes the potential of the Savage River orebody', pp. 13-26 in Bell, LC, Barrie, BMD, Braddock, B, McLean, RW (eds), *Proceedings of the Sixth Australian Workshop on Acid and Metalliferous Drainage*, 15-18 April 2008, Burnie, Tasmania, ACMER, Brisbane.

Williams, DJ, Wilson, GW, Scott, PA, Hutcheson, B, Kent, S, Hughes, A (2014). Savage River Rehabilitation Project—2002 TO 2013, pp. 21-36 in Miller, H, Preuss, L (eds), *Proceedings of the Eighth Australian Workshop on Acid and Metalliferous Drainage*, 29 April - 2 May 2014, Adelaide, South Australia.

5.3 Mengidentifikasi dan melindungi nilai-nilai utama lingkungan

5.3.1 Mengidentifikasi nilai-nilai

Air adalah fokus dari bagian ini, karena merupakan media yang paling terpengaruh oleh lepasnya DAL ke luar lokasi. Nilai-nilai lingkungan untuk air adalah nilai-nilai yang menentukan penggunaan akhir sumber daya air. Menentukan nilai-nilai tersebut untuk proyek pertambangan merupakan tahap pertama dalam menilai tingkat risiko yang ditimbulkan oleh DAL dan sejauh mana tindakan manajemen yang mungkin diperlukan untuk mengurangi risiko ke tingkat yang dapat diterima. Terlepas dari yurisdiksi, identifikasi nilai-nilai yang paling awal dan efektif menjadi perhatian regulator dan masyarakat lokal, serta pengembangan strategi yang disepakati untuk mengatasi masalah tersebut, mengurangi kemungkinan kerusakan reputasi atau tantangan berikutnya untuk proyek tersebut.

Misalnya, nilai air dapat didefinisikan untuk pemeliharaan ekosistem yang berkelanjutan dan fungsional (misalnya, nilai-nilai satwa liar atau perikanan) atau untuk utilitas umum (seperti irigasi) atau kesehatan manusia (misalnya, dapat diminum). Penggunaan air tanah mungkin lebih sulit untuk didefinisikan, tetapi harus mencakup perhitungan perlindungan stigofauna (jika ada), ekosistem yang bergantung pada air tanah dan air permukaan lainnya (seperti mata air), serta dapat diminum dan digunakan industri jika relevan.

Prinsip-prinsip yang relevan dengan penentuan nilai air dan pemilihan konsekuensi kriteria kualitas air harus pelestarian tertinggi yang ada atau nilai yang disepakati untuk masa depan. Konsekuensinya, kegiatan penambangan tidak harus mengarah pada degradasi air permukaan atau kualitas air tanah yang akan mencegah pemeliharaan nilai kualitas air tertinggi yang telah disepakati dengan para pemangku kepentingan atau jika diperlukan untuk dipatuhi (Batley et al. 2003). Ini tidak berarti bahwa tidak boleh ada perubahan terukur dalam parameter kualitas air, melainkan bahwa tingkat perubahan tidak harus menghasilkan degradasi kualitas air ke titik di mana nilai lingkungan yang ada ditempatkan pada risiko yang signifikan. Prinsip ini konsisten dengan persyaratan pemerintah dan harapan pemangku kepentingan lainnya, serta sebagai aspirasi keberlanjutan perusahaan pertambangan praktik kerja unggulan. Hal ini juga memungkinkan fleksibilitas dalam menerapkan atau mengambil pedoman nilai-nilai kualitas air berdasarkan kondisi dasar geokimia dan sosial/ lingkungan yang relevan untuk lokasi tambang tertentu.

Sejumlah nilai-nilai lingkungan secara khusus ditetapkan dalam *Pedoman kualitas air Australia (Australian water quality guidelines)* (ANZECC-ARMCANZ 2000a) yang mencakup ekosistem air; industri primer (irigasi dan penggunaan air umum, penyiraman ternak, budidaya dan konsumsi manusia dari makanan akuatik); rekreasi dan estetika; nilai-nilai budaya dan spiritual air minum; dan industri, serta pedoman kriteria untuk kualitas air untuk perlindungan ekosistem perairan, industri primer dan nilai-nilai estetika yang diberikan. Sejumlah nilai-nilai lingkungan secara khusus ditetapkan dalam *Pedoman kualitas air Australia (Australian water quality guidelines)* (ANZECC-ARMCANZ 2000a) yang mencakup ekosistem air; industri primer (irigasi dan penggunaan air umum, penyiraman ternak, budidaya dan konsumsi manusia dari makanan akuatik); rekreasi dan estetika; nilai-nilai budaya dan spiritual air minum; dan industri, serta pedoman kriteria untuk kualitas air untuk perlindungan ekosistem perairan, industri primer dan nilai-nilai estetika yang diberikan. Rincian lebih lanjut tentang derivasi dari *Pedoman kualitas air* dan aplikasinya tersedia di bawah. Kriteria yang dibutuhkan untuk memenuhi standar air minum yang diberikan dalam *pedoman air minum Australia* (NHMRC-NRMMC 2011). Kriteria untuk mengelola perairan terpapar DAL digunakan untuk rekreasi, seperti danau pit, yang dalam *Pedoman untuk mengelola risiko dalam air rekreasi (Guidelines for managing risk in recreational water)* (NHMRC 2008).

Secara umum, pedoman untuk perlindungan ekosistem perairan yang lebih ketat dari air yang untuk diminum, yang pada gilirannya lebih ketat dibandingkan untuk industri primer dan rekreasi. Tidak ada pedoman kualitas air yang tersedia untuk penggunaan air industri, yang harus ditentukan atas dasar kasus per kasus. Nilai kualitas air budaya dan spiritual juga tidak didefinisikan dengan baik, dan harus ditentukan melalui konsultasi dengan kelompok-kelompok sosial yang relevan.

Dalam semua kasus, nilai-nilai dan tingkat konsekuensi perlindungan harus ditetapkan melalui diskusi dengan kelompok pemangku kepentingan yang relevan sebelum pertambangan dimulai, sehingga profil risiko proyek

dapat ditetapkan sepenuhnya. Semua jenis operasi pertambangan—di lokasi-lokasi greenfield dan brownfield serta lokasi warisan—perlu untuk melakukan proses ini.

5.3.2 Pedoman perlindungan nilai-nilai lingkungan

Jika perlindungan ekosistem perairan adalah nilai tertinggi yang disepakati, maka pedoman perlindungan ekosistem perairan untuk melestarikan air keragaman biota dan fungsi ekosistem (ANZECC-ARMCANZ 2000a) adalah nilai-nilai yang kemungkinan besar awalnya akan diterapkan oleh regulator di seluruh Australia dan New Zealand untuk menentukan manajemen atau kepatuhan tujuan untuk perairan yang mungkin akan terpengaruh oleh DAL (Batley et al. 2003). Namun, karena kerangka kerja ANZECC-ARMCANZ (2000a) sangat terpandang di mata internasional, mungkin diharapkan bahwa penerapan pendekatan tersebut akan dilihat menguntungkan dalam yurisdiksi lain.

Tabel 3.4.1 di ANZECC-ARMCANZ (2000a) merangkum pedoman kualitas air untuk air tawar dan ekosistem laut. Pedoman untuk irigasi, penggunaan umum, air minum ternak, budidaya air, rekreasi dan estetika terdapat dalam ANZECC-ARMCANZ (2000c).

Pedoman kriteria kualitas air yang tercantum dalam ANZECC-ARMCANZ (2000a) disajikan dalam konteks sejumlah kategori nilai generik, yang mencerminkan tingkat perlindungan yang dibutuhkan untuk mempertahankan nilai-nilai tersebut. Sebuah kerangka kerja juga disediakan untuk pendekatan berbasis risiko inovatif yang dapat diterapkan untuk menurunkan criteria kualitas air untuk melindungi nilai-nilai lokal yang spesifik.

Nilai konsentrasi yang terdaftar di ANZECC-ARMCANZ (2000a) tetapkan sebagai 'nilai-nilai pemicu'. Dalam praktik, nilai-nilai pemicu biasanya dibandingkan dengan konsentrasi zat terlarut yang diukur dalam sampel air saringan. Nilai-nilai tersebut dirancang untuk memicu penyelidikan dan/atau manajemen tindakan lebih lanjut jika terlampaui. Nilai pedoman yang terlampaui dengan margin kecil tidak dengan sendirinya berarti bahwa telah terjadi dampak negatif, karena ada tingkat konservatisme yang ditetapkan di dalam derivasi nilai-nilai. Jika nilai pemicu melampaui di jalur air yang dipengaruhi oleh keluarnya DAL, maka tindakan pengelolaan utama yang melampaui harus dihentikan dengan mencegah pelepasan tersebut atau memproses sumber air). Tindakan kedua selanjutnya harus menentukan apakah dampak buruk telah terjadi, karena konsekuensinya adalah salah satu yang akan paling menjadi perhatian bagi regulator dan pemangku kepentingan lainnya.

Sejak ekosistem air cenderung mewakili nilai penggunaan tertinggi untuk perairan dipengaruhi oleh DAL di Australia, dituntut diskusi lebih lanjut tentang dari mana tingkat perlindungan yang berbeda berasal dan diterapkan. Pedoman nilai-nilai kualitas air untuk perlindungan ekosistem air sering lebih ketat dari nilai-nilai pengguna akhir, jadi jika nilai-nilai ekosistem perairan dilindungi maka nilai-nilai kualitas air lain yang kurang menuntut juga cenderung harus dilindungi.

Pedoman kualitas air menyediakan tiga tingkat perlindungan ekosistem perairan untuk dipertahankan terhadap paparan yang berkelanjutan (kronis) terhadap potensi racun-racun:

- nilai konservasi ekosistem/ekologis tinggi (99% dari spesies dilindungi)
- ekosistem sedikit-cukup terganggu (95% dari spesies dilindungi)
- ekosistem yang sangat terganggu (80-90% dari spesies dilindungi)

Nilai-nilai pemicu yang ditetapkan dalam pedoman kemungkinan besar akan diwajibkan pada tingkat 95% bagi banyak lokasi tambang greenfield karena ekosistem mungkin akan sedikit hingga sedang terganggu. Tingkat perlindungan yang lebih rendah, seperti 90% atau bahkan 80%, dapat dipertimbangkan untuk lokasi yang sebelumnya terganggu, misalnya dengan padang rumput untuk ternak (grazing) atau penambangan bersejarah, dengan sudah menurunkan nilai kualitas air sebagai konsekuensinya. Tingkat perlindungan yang akan diwajibkan akan perlu dibahas dan disepakati bersama para pemangku kepentingan, karena ini memutuskan nilai-nilai pedoman kualitas air yang akan diterapkan.

Nilai-nilai pedoman yang berasal dari data dose-response biologis yang paling meyakinkan dan relevan tersedia. Namun bersifat generik karena kebutuhan. Oleh karena itu, mungkin overprotektif (atau bahkan tidak cukup protektif) di bawah beberapa kondisi. Kerangka kerja ANZECC-ARMCANZ (2000a) menyediakan sarana guna memodifikasi nilai generik untuk memperhitungkan kondisi regional, lokal atau bahkan kondisi spesifik-lokasi (seperti untuk pelepasan ke sungai individu atau danau). Misalnya, faktor modifikasi (jika tersedia) dapat diterapkan untuk memperhitungkan pH lokal dan kesadahan air. Luasnya toleransi spesies air lokal untuk racun spesifik juga dapat diperhitungkan. Namun, ini dapat merupakan proses yang sangat panjang dan mahal untuk dilaksanakan. Contoh-contoh spesifik dari asal pedoman kualitas air setempat terdapat dalam van Damet al. (2014).

Nilai-nilai pedoman telah diambil dari hubungan dose-response untuk paparan racun kronis. Namun, tidak secara implisit mengatasi efek biomagnifikasi, di mana konsentrasi toksikan sedemikian meningkat hingga ke rantai makanan. Dengan demikian, nilai pedoman kualitas air yang melindungi kesehatan organisme di tingkat trofik (rantai makanan) yang lebih rendah mungkin tidak melindungi kesehatan organisme (atau air atau darat) di tingkat trofik yang lebih tinggi. Oleh karena itu perlu diberikan pertimbangan khusus saat menilai risiko-risiko yang ditimbulkan oleh DAL yang bermuatan satu atau lebih dari unsur-unsur Hg, Se, Cd, dan apakah faktor tambahan keamanan perlu diterapkan (ANZECC-ARMCANZ 2000b).

Perhatikan juga bahwa nilai-nilai pedoman yang disajikan dalam ANZECC-ARMCANZ (2000b) untuk penekan kimia fisika daerah (pH, salinitas, suhu, kekeruhan, nutrisi dan konsentrasi oksigen terlarut) tidak memasukkan data uji toksisitas sama sekali. Sebaliknya, mereka mewakili persentil ke-80 dari sejumlah set data sejarah yang diperoleh dari seluruh wilayah. Oleh karena itu, janganlah diasumsikan bahwa kepatuhan terhadap asal nilai-nilai regional akan konsisten dengan perlindungan ekosistem perairan pada tingkat yang disepakati untuk sebuah proyek.

Data kualitas air permukaan yang diperoleh dari lokasi awal (referensi) (sampel sebelum gangguan dan/atau lereng naik pengaruh pertambangan) harus digunakan untuk menginformasikan penetapan sasaran kualitas air dan kriteria untuk kepatuhan operasional dan penutupan. Idealnya, lokasi referensi tersebut harus dipantau secara gabungan dengan lokasi yang berpotensi terpengaruh oleh aktivitas pertambangan dengan mengaktifkan variasi kualitas air hulu alami untuk dibedakan dari yang disebabkan oleh pertambangan.

Pemeliharaan nilai-nilai kualitas air harus diperhatikan bukan hanya untuk tahap pertambangan operasional tetapi juga dalam jangka panjang setelah penutupan. Tujuan dan ukuran kinerja harus didefinisikan dalam kriteria penutupan. Pedoman jenis pemantauan operasional dan penutupan diperlukan terdapat dalam Bagian 9.

Air permukaan dan air tanah dari tangkapan air yang bermuatan sumber daya mineral sering memperlihatkan peningkatan konsentrasi zat dasar terlarut karena asal geologi mereka. Dengan demikian, dari penilaian risiko DAL dan perspektif pengelolaan, pedoman kualitas air setempat mungkin unik sejauh kualitas air spesifik lokasi mungkin diperlukan (McCullough & Pearce 2014) untuk menghindari aplikasi, secara default, kriteria perlindungan generik dari yang tidak realistis rendah. Dalam konteks ini, perbandingan pertama biasanya akan dibuat oleh para pemangku kepentingan dengan pedoman kriteria kualitas air baku yang berlaku untuk tingkat proteksi yang disepakati. Variasi lokasi khusus hanya akan dapat dipertimbangkan atas dasar bukti kualitas yang tersedia (misalnya, dataset kualitas air dasar pra-tambang yang kuat, atau kelimpahan dan keragaman data untuk organisme akuatik lokal).

Pendekatan alternatif untuk memantau dan mengelola kualitas air mungkin diperlukan di mana data dasar tidak tersedia dan/atau di mana jenis tertentu dari ekosistem perairan dengan karakteristik unik mengharuskan penerapan selain pedoman umum untuk perlindungan terhadap risiko toksisitas DAL. Dalam kasus tersebut, mungkin diperlukan penilaian ekotoksikologi menggunakan perairan lokasi yang relevan dan spesies lokal.

Penilaian praktik kerja unggulan terhadap potensi dampak pelepasan air terpapar DAL jauh melampaui dari hanya melaporkan dan mematuhi pedoman kualitas air baku yang telah disepakati dengan para pemangku kepentingan. Hal ini mencakup pengembangan, dan melaporkan, pendekatan garis-garis ganda bukti (termasuk indikator biologis di mana yang sesuai) untuk memperlihatkan kurangnya dampak atau risiko yang signifikan.

5.4 Kerangka kerja untuk menilai risiko DAL pada lingkungan

5.4.1 Menetapkan bahaya yang ditimbulkan oleh DAL

Penilaian risiko DAL di Australia akan paling sering diarahkan ke perlindungan lingkungan penerima, karena mereka biasanya reseptor yang paling peka. Namun, keterlibatan dengan pemangku kepentingan harus digunakan sebagai peluang untuk membahas aspek-aspek spesifik (misalnya, teknis, lingkungan, hukum, perusahaan, keuangan, peraturan dan sosial) yang juga perlu ditangani dalam penilaian risiko.³³

Penilaian risiko lingkungan adalah sarana yang berguna untuk memahami dan mengelola risiko DAL, karena memperhitungkan model kontaminan-transportasi-reseptor (CTR) yang mendefinisikan potensi kontaminasi DAL untuk mempengaruhi reseptor yang didefinisikan (Gambar 18). Dalam model CTR, risiko lingkungan DAL dapat dikurangi dengan strategi-strategi yang mencegah mulainya kontaminasi; dengan tidak adanya jalur transportasi yang signifikan dari sumber ke lingkungan penerima; atau dengan kehadiran hanya reseptor yang berkapasitas nilai rendah (atau toleran).

Setelah penentuan besarnya potensi sumber DAL, lingkungan penerima yang potensial harus diidentifikasi dan nilai-nilainya ditetapkan dalam konsultasi dengan pemangku kepentingan. Hewan darat mungkin perlu diperhitungkan sebagai reseptor untuk analisis ini, karena mereka dapat bio/orbio akumulat memperbesar elemen (misalnya, Cd, Hg dan Se) dengan mengkonsumsi air, hewan air dan tumbuhan. Demikian juga, kontaminasi tanah oleh DAL mungkin perlu dinilai sebagai sumber bagi flora darat dan fauna.³⁴ Akumulasi elemen DAL yang diturunkan di 'padang semak' juga dapat berpotensi mempengaruhi kesehatan konsumen masyarakat Pribumi. Akibatnya, jalur kontaminan ini harus dimasukkan dalam penilaian risiko yang relevan. Jadwal B5 dari Tindakan Perlindungan Lingkungan Lokasi Nasional (Sites National Environment Protection Measure (NEPM)), yang berkaitan dengan penilaian risiko ekologi, menetapkan proses untuk menilai kontaminasi tanah dan air yang dapat disebabkan oleh keluarnya DAL di lokasi tambang.³⁵

Setelah reseptor potensial dan nilai-nilai mereka didefinisikan, mekanisme transportasi yang ada dan potensial harus diperiksa secara kritis. Penyelenggaraan lokakarya jalur potensial dengan panel multidisiplin yang terdiri dari para pakar internal dan eksternal dapat menjadi cara yang sangat berguna untuk membangun pemahaman yang kuat dari risiko kontaminan. Pengembangan oleh tim tersebut dari diagram konseptual untuk menentukan sumber kontaminan, mekanisme transportasi dan reseptor potensial DAL untuk seluruh lokasi merupakan langkah penting untuk membingkai diskusi lebih lanjut tentang besarnya potensi risiko, dan apakah mungkin perlu dikurangi.

³³ Lihat Bagian 10: Mengkomunikasikan permasalahan DAL kepada para pemangku kepentingan dan investor.

³⁴ Lihat Lampiran 1.

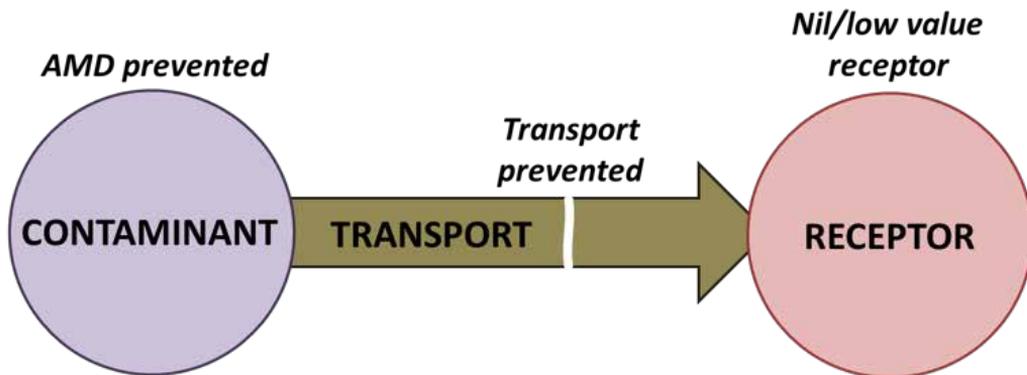
³⁵ <http://www.scew.gov.au/system/files/resources/93ae0e77-e697-e494-656f-afaaf9fb4277/files/7-ecological-risk-assessment.pdf>.

Potensi untuk proses transportasi harus dipertimbangkan untuk peristiwa curah hujan dengan selang kembali minimal 1:100 tahunan selama masa operasi tambang. Selang kembali yang jauh lebih lama (seperti kemungkinan banjir maksimal, atau PMF) mungkin perlu diperhitungkan untuk rencana penutupan, mengingat lokasi biasanya akan diminta untuk mempertahankan kinerja tanpa intervensi manajemen aktif selama jangka waktu yang panjang ini (Logsdon 2013). Dua jenis proses perlu dipertimbangkan.

- bilasan segera oleh peristiwa cuaca atas produk DAL yang disimpan di lokasi (misalnya, di kolam)
- produksi rembesan tertunda setelah peristiwa.

Proses kedua didorong oleh perkolasi curah hujan yang menyusup melalui limbah yang bermuatan produk oksidasi yang mudah larut. Keterlambatan respons sistem dapat berarti DAL berkekuatan tinggi dapat dikirim ke jalur air seperti air surut tanpa diencerkan secara substansial.

Gambar 18: Model kontaminan–transportasi–reseptor untuk menilai risiko DAL



5.4.2 Menilai risiko DAL

Penilaian risiko dapat digunakan untuk mengevaluasi dan menentukan peringkat pentingnya bahaya DAL tertentu. Secara umum, penilaian risiko dilakukan dalam lokakarya yang menggunakan minimal staf internal dengan pengetahuan tentang proyek dan konteks sosial lingkungan tingkat lokasi dan perusahaan. Staf dari bagian lingkungan, perencanaan tambang, hidrogeologi dan keterlibatan masyarakat harus dilibatkan. Saran dari para ahli eksternal mungkin sering diminta di mana keahlian khusus tidak tersedia di tempat, di mana risiko DAL cenderung tinggi, atau di mana permasalahan yang terlibat yang rumit secara teknis.

Contoh kerangka kerja penilaian risiko DAL diperlihatkan pada Tabel 10. Selain komponen risiko biasa tentang kemungkinan dan konsekuensi, rincian tentang batas spasial dan durasi bahaya yang cenderung terjadi telah dimasukkan.

Tabel 10: Contoh kategori komponen risiko dan penilaian peringkat terakhir

PEMBOBOTAN	KEMUNGKINAN TERJADI (LIKELIHOOD)	KONSEKUENSI/ AKIBAT	JANGKAUAN (EXTENT)	DURASI	PERINGKAT	KLASIFIKASI
1	Jarang (rare)	Tidak penting (insignifikan)	Terdekat (immediate)	Berhari-hari	1-4	Sangat Rendah
2	Tidak mungkin (unlikely)	Minor	Sekitar	Berbulan-bulan	5-36	Rendah
3	Kemungkinan (possible)	Penting/besar (signifikan)	Lokal	Bertahun-tahun	37-144	Moderat/ sedang
4	Kemungkinan besar (likely)	Mayor	Daerah Tangkapan Air	Beberapa dekade	145-400	Tinggi
5	Hampir pasti (almost certain)	Katastrofik/ bencana	Regional	Berabad-abad	400-625	Ekstrim

Dalam contoh ini, bobot telah ditetapkan pada skala dari 1 hingga 5 (terendah ke tertinggi). Namun, setiap skala dapat digunakan asalkan konsisten dan jelas sebelum digunakan. Peringkat risiko secara keseluruhan diperoleh dengan perkalian berturut-turut masing-masing komponen kategori bobot. Maksimal yang mungkin pada peringkat risiko di empat kolom pada Tabel 10 sehingga akan 625 (yaitu, $5 \times 5 \times 5 \times 5$). Setelah mitigasi, tujuannya untuk mengurangi risiko melalui penurunan nilai dari satu atau lebih dari komponen nilai kategori.

Matriks penilaian risiko dapat digunakan untuk menilai kemungkinan efektivitas strategi manajemen guna mengurangi atau bahkan menghindari risiko DAL untuk sosial dan/atau lingkungan penerima. Tabel 11 contoh kerja menggunakan bobot yang ditetapkan dalam Tabel 10.

Tabel 11: Contoh penilaian risiko, termasuk asal mula awal dari peringkat risiko dan efek strategi pengelolaan potensial penutupan pada pengurangan kontribusi risiko komponen awal.

PROFIL ASAL BAHAYA: PELINDIAN DAL DARI PAF DALAM WRD				
KEMUNGKINAN TERJADI (LIKELIHOOD)	KONSEKUENSI	JANGKAUAN	DURASI	RISIKO
Kemungkinan besar (perembesan DAL diprediksi karena bahan penutup cungkup yang digunakan buruk) 4	Minor (kemungkinan besar tak ada reseptor sensitif yang terpengaruh) 2	Minor (kemungkinan besar tak ada reseptor sensitif yang terpengaruh) 2	Minor (kemungkinan besar tak ada reseptor sensitif yang terpengaruh) 5	Sedang/moderat 80
				
PROFIL RISIKO YANG TELAH DIREVISI: MOTIGASI DENGAN REMBESAN LANGSUNG WRD KE CEKUNGAN PENGUAPAN UNTUK PERISTIWA PMF				
KEMUNGKINAN TERJADI (LIKELIHOOD)	KONSEKUENSI	JANGKAUAN	DURASI	RISIKO RESIDUAL/SISA
Kemungkinan besar rembesan DAL diprediksi karena bahan penutupan cungkup yang buruk) 4	Minor (kemungkinan besar tak ada reseptor sensitif yang terpengaruh) 1	Terdekat (sedikit transportasi menjauhi dari lokasi) 1	Panjang (kemungkinan produksi DAL berabad-abad) 5	Rendah 20

Potensi dampak kumulatif dari sumber yang sudah ada drainase tambang yang terletak di tempat lain di DAS di mana tambang sedang dikembangkan juga harus dipertimbangkan sebagai bagian dari penilaian risiko. Regulator menjadi semakin khawatir tentang masalah ini di daerah DAS yang berisi beberapa sumber input dari zat terlarut (Bagian 8.4).

6.0 MENGELOLA BAHAN SULFIDA UNTUK MENCEGAH DAL

Pesan-pesan kunci

- Meminimalkan (yaitu, pencegahan) proaktif sumber DAL lebih disukai daripada pengendalian atau pengolahan untuk mengelola risiko DAL.
- Pemilihan meminimalkan DAL optimal dan pengendalian strategi adalah lokasi spesifik.
- Metode bangunan penimbunan-akhir telah mengakibatkan WRD menjadi faktor risiko DAL tunggal terbesar di banyak lokasi tambang.
- Identifikasi berkelanjutan dan pemisahan limbah pembentuk DAL, ditambah dengan lapisan penutup penengah dan pepadatan antara lift (konstruksi atas tanah), merupakan strategi pencegahan DAL yang efektif untuk WRD.
- Jalan pintas diambil dalam deposisi limbah untuk memperoleh penghematan biaya langsung dapat secara substansial diimbangi dengan biaya AMD jangka panjang berikutnya dan pengelolaan kualitas air. Perlu adanya koordinasi yang erat antara para wali model blok AMD dan perencana tambang untuk meminimalkan risiko tersebut.
- Meminimalkan risiko DAL jangka panjang untuk batuan dan tailing yang tetap berada di atas permukaan tanah yang membutuhkan rekayasa pembangunan sistem tertutup berkelanjutan untuk meminimalkan masuknya oksigen dan/atau untuk meminimalkan perkolasi bersih curah hujan.
- Desain penyimpanan tailing sulfida praktik kerja unggulan harus sedapat mungkin berkelanjutan mengoptimalkan saturasi dari massa tailing, sehingga integritas geokimia dari sebagian besar bahan dapat dipertahankan dalam jangka panjang.

Strategi untuk mengelola AMD digolongkan dalam tiga kategori umum:

- sistem tertutup oksidasi dan transportasi produk oksidasi
- pengendalian untuk mengurangi muatan kontaminan yang menyelinap ke luar ke lingkungan
- perlakuan aktif atau pasif untuk memungkinkan air digunakan kembali atau dilepaskan.

Kategori kedua dan ketiga juga berlaku untuk semua jenis bahan tambang yang dapat menghasilkan lindi yang dapat mempengaruhi lingkungan penerima. Dari pengurangan risiko dan sudut pandang keberlanjutan, meminimalkan jumlah limbah bermasalah yang diproduksi dan pembendungan yang efektif lebih disukai untuk pengendalian, yang pada gilirannya lebih difavoritkan daripada pengolahan. Bagian ini menjelaskan minimalisasi dan strategi pengendalian untuk WRD, TSF, dan danau pit dan komentar tentang permasalahan tertentu pada brownfield dan warisan lokasi. Pengolahan DAL dibahas dalam Bagian 7.³⁶

³⁶ Untuk diskusi yang menggelitik pemikiran masalah yang lebih luas dibahas dalam bagian ini, lihat Wilson (2008).

Identifikasi meminimalkan secara optimal dan pengendalian strategi untuk lokasi tertentu akan tergantung pada iklim; topografi; metode pertambangan; jenis bahan (seperti batuan sisa, tailing, dinding batuan dan tumpukan bahan pelindian); jenis tanah dan batu; mineralogi dan tersedia sumber netralisasi; dan antar-hubungan antara faktor tersebut (Miller 2014). Penempatan selektif dan enkapsulasi bahan limbah berdasarkan karakteristik fisik dan pembentuk DAL yang diketahui dan profil risiko sering disukai oleh praktik pengelolaan DAL selama operasi penambangan.

6.1 Pengelolaan timbunan batuan sisa untuk meminimalkan DAL

6.1.1 Pertimbangan-pertimbangan umum

Pedoman konstruksi di bawah ini merujuk pada bahan berpotensi pembentuk asam (potentially acid-forming (PAF)). Istilah ini berlaku untuk semua jenis batuan sisa dengan risiko DAL tinggi, termasuk potensi NMD dan SD, sebagai akibat dari oksidasi sulfida yang terkandung dalam bahan. Untuk menjamin stabilitas jangka panjang dan kinerja keseluruhan WRD, geoteknik serta geokimia properti perlu diketahui untuk batuan dan bahan lainnya yang digunakan untuk konstruksi. Informasi lebih lanjut tentang karakterisasi dan sifat bahan tersebut disediakan dalam Pedoman GARD, dalam referensi desain sampul yang dikutip dalam Bagian 6.3 dan di studi kasus 6 dan 7 di bagian ini.

Untuk WRD permukaan, termasuk dalam struktur valley-fill, PAF atau batuan sisa berpotensi muatan zat terlarut bertingkat tinggi harus diidentifikasi dan dikelola dengan tepat sejak awal operasi. Kategori limbah tersebut harus ditempatkan secara selektif dan dikemas dengan bahan DAL-jinak (risiko DAL rendah atau limbah NAF dan/atau batuan sisa dengan kelebihan ANC) (lihat Gambar 19). Batuan yang diusulkan untuk digunakan untuk enkapsulasi juga harus ditandai potensinya untuk menghasilkan NMD dan/atau SD, karena bahan tersebut dapat menimbulkan risiko DAL yang signifikan dalam bahan itu sendiri. Risiko DAL diberikan oleh jenis limbah, dan bagaimana hal itu dikelola, harus didasarkan pada potensi muatan zat terlarut, daripada pada hanya pH yang diprediksi.

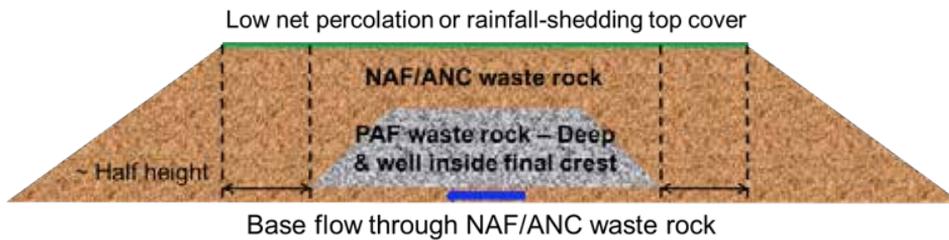
Masuknya limpasan atau air tanah dekat permukaan ke dasar WRD merupakan potensi bahaya yang harus dikendalikan. Strategi manajemen yang paling efektif untuk membatasi masuknya aliran permukaan ke WRD adalah untuk mencegah limpasan curah hujan bersih oleh saluran pengalihan yang terletak di lereng naik WRD.

Tergantung pada topografi tapak WRD, bantalan NAF dan/atau batuan sisa AC (penyerap-asam) mungkin juga perlu yang pertama ditempatkan untuk menyediakan jalur aliran non-kontaminan untuk limpasan curah hujan dari hulu tumpukan.³⁷ Jika tidak, limpasan mungkin menemukan jalan di sepanjang saluran drainase yang dipendam dan sungai di bawah tumpukan. Mungkin juga dibutuhkan untuk memberikan lapisan penyumbatan atas saluran drainase yang dipendam untuk membatasi potensi migrasi rembesan terkontaminasi dari batuan sisa PAF diletakkan di atasnya. Atau, bebas menguras NAF dan/atau AC batuan sisa yang dapat diambil setinggi-tingginya atas saluran drainase alami, meskipun hal ini akan membutuhkan pasokan batuan besar limbah non-kontaminan.

Jika memungkinkan, risiko DAL tinggi limbah sulfida batuan tidak harus tersimpan sehingga terletak di bawah lereng luar dari WRD, seperti lereng yang sulit untuk disumbat dan lebih mudah memungkinkan masuknya oksigen infiltrasi dan curah hujan. Enkapsulasi bersisi lebar (Gambar 19) oleh batuan sisa NAF atau AC diperlukan sehingga setiap infiltrasi hujan ke dalam lereng sisi operasional dan lereng akhir tidak akan berpotongan pada PAF atau zat terlarut tinggi potensi batuan sisa. Puncak limbah timbunan mengalami konstruksi, dan dengan bahan berisiko tinggi DAL di terletak di pusat, harus secara progresif ditutupi antara lift-lift (konstruksi atas tanah) oleh lapisan padat batuan sisa NAF atau AC. Idealnya ini dilakukan sebelum setiap musim hujan untuk membatasi infiltrasi curah hujan ke dalam batuan sisa PAF selama operasi dan untuk mengurangi waktu oksidasi. Pada penutupan, diperlukan sebuah jaring perkolasi rendah atau penepisan air curah hujan, penutup non-kontaminan di atas puncak permukaan rata WRD dan pada setiap bangku sisa.

³⁷ Lihat studi kasus Savage River di Bagian 5.

Gambar 19: Enkapsulasi sisa bahan reaktif butiran kasar



Kemampuan untuk secara memadai mengenkapsulasi PAF atau batuan sisa bermuatan zat terlarut tinggi (NMD atau SD) merupakan fungsi proporsi PAF pada batuan sisa NAF/AC dan perubahan rasio seiring dengan kemajuan proses pertambangan. Secara umum, batuan yang ditambang yang terletak di atas lapisan air tanah akan telah teroksidasi dari waktu ke waktu geologi, dan setiap batuan sisa PAF mungkin akan dapat diambil dari bawah lapisan air tanah karena kurangnya paparan oksigen pada kedalaman itu. Batuan sisa alkalin (AC) dapat terjadi baik di atas maupun di bawah lapisan air tanah tersebut. Batuan sisa yang teroksidasi biasanya akan keluar dari lubang pertama dan kemudian dari batuan sisa PAF, meskipun ada banyak contoh di mana proses tersebut belum terjadi.

Pit-pit terbuka yang awalnya dikembangkan untuk semua shell pit yang telah direncanakan dan kemudian diperluas ke kedalaman biasanya menghadapi batuan sisa NAF dulu dan kemudian batuan sisa PAF apa saja yang ada. Pit-pit terbuka yang ditambang dengan serangkaian cut-back menghadapi urutan selang seling batuan sisa NAF dan PAF pada setiap cut-back. Pada kedua kasus urutan yang berbeda dari penanganan dan penempatan yang ditentukan agar memastikan penggunaan maksimal bahan NAF dan AC untuk mengenkapsulasi bahan yang berisiko lebih tinggi. Misalnya, terutama batuan sisa NAF atau AC akan diproduksi oleh kasus pertama, dan ini mungkin perlu disimpan dalam 'cincin tanggul' atau pengaturan 'donat', meninggalkan inti terbuka sentral di mana selanjutnya batuan sisa didominasi PAF dapat ditempatkan. Kegagalan untuk mengoptimalkan penggunaan bahan NAF atau ANC saat diproduksi dapat dengan serius membahayakan masa depan minimalisasi efektif risiko DAL pada pekerjaan penambangan yang berlangsung.

Untuk dapat secara efektif mengelola batuan sisa, penting untuk terus merekam tonase dari berbagai jenis batuan sisa dan lokasinya di WRD yang terus berkembang dan secara teratur meninjau penempatan batuan sisa untuk memastikan bahwa rencana pengelolaan batuan sisa tepat dilaksanakan. Informasi ini juga harus digunakan untuk menghasilkan model blok 3D WRD yang berkembang, yang akan sangat memfasilitasi perencanaan penutupan dengan menyediakan dasar yang kuat untuk pengujian efektifitas desain yang diusulkan untuk membatasi risiko DAL. Pengujian ini dapat dilakukan dengan menggunakan model-model komputer.

6.1.2 Timbunan-akhir konvensional WRD

WRD permukaan secara konvensional telah dibangun dengan timbunan-akhir yang longgar dari truk angkut dan/ atau dozing ke atas tip-head. Hal ini menyebabkan partikel butiran kasar meluncur ke ujung sudut lereng kritis untuk membentuk zona puing-puing dasar, dan pembentukan sudut lereng kritis yang terputus-putus di dalam tumpukan yang menyelang-nyeling bahan butiran halus dan butiran kasar (gambar 20 dan 21). Permukaan atas setiap tumpukan atas tanah menjadi dipadatkan dengan truk angkut yang memuatnya.

Metode pembangunan timbunan-akhir telah mengakibatkan WRD berkemungkinan sebagai faktor tunggal risiko DAL terbesar di banyak lokasi tambang.

Timbunan-akhir konvensional WRD yang bermuatan batuan sisa PAF pada dasarnya adalah 'reaktor oksidasi', dengan pasokan siap oksigen yang tersedia melalui zona dasar puing-puing dan di atas lapisan butiran kasar sudut lereng kritis didorong oleh adveksi dan konveksi, dari mana oksigen menyebar ke dalam lapisan-lapisan sudut lereng kritis berbutiran halus dan basah di sebelahnya. Lapisan berbutiran halus berpermukaan sangat tinggi pada rasio volume, yang mendukung oksidasi dan penyimpanan uap lembab dan hasil oksidasi. Selama pembangunan WRD yang bermuatan batuan sisa PAF, akan sulit untuk membatasi oksigen dan perembesan curah hujan ke dalam tumpukan tersebut.

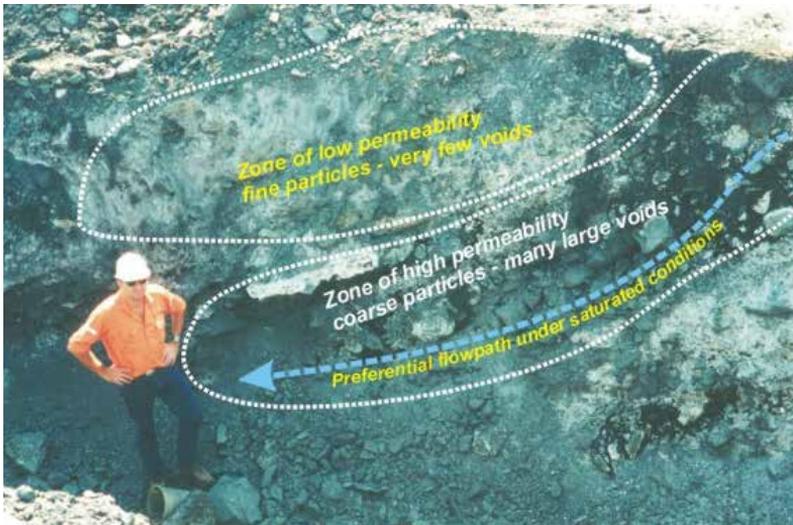
Untuk WRD yang dibangun dengan timbunan-akhir, DAL sebaiknya dikurangi dengan membatasi aliran air ke tumpukan sehingga mengurangi media transportasi untuk produk oksidasi. Namun, dalam banyak kasus ini adalah menerapkan strategi pengelolaan yang berlaku surut yang hanya dapat bekerja dengan membatasi pelindian produk oksidasi yang sudah terbentuk. Dalam skenario ini, kesempatan untuk membatasi risiko DAL dengan meminimalkan sebagian besar sumber masalah telah hilang.

Gambar 20: Zona kepingan dasar (atas); sudut lereng kritis and lapisan lalu-lintas (bawah)





Gambar 21: Pemandangan WRD terbuka memperlihatkan zona-zona berbagai jenis bahan dan ukuran partikel



Sumber: Peralatan Tim NT 2004 Kontribusi oleh M Fawcett.

Dimana ditemukan batuan sisa PAF, menambang pit terbuka dengan serangkaian cut-back adalah cara yang paling efisien untuk mengelola potensi pembentukan DAL dalam WRD yang sedang dibangun dengan timbunan-akhir konvensional. Hal ini akan memudahkan enkapsulasi progresif batuan sisa PAF dengan batuan sisa NAF dan/atau AC, tanpa perlu penimbunan menengah dan penanganan ganda batuan sisa NAF/AC yang mahal. Cut-back progresif juga lebih memudahkan penimbunan batuan sisa (batuan sisa PAF, khususnya) in-pit ke ujung lubang yang selesai. Di mana sejumlah lubang ditambang secara berurutan, lubang yang digali mungkin juga tersedia untuk penahanan yang efektif dan enkapsulasi batuan sisa PAF.

6.1.3 Laju oksidasi dan jeda waktu untuk produksi DAL

Melacak lokasi dari jenis batuan sisa dalam WRD terutama penting jika laju oksidasi sulfida lambat atau jeda waktu untuk produksi DAL berlarut-larut, karena jelas DAL tidak mungkin dilepas ke lingkungan sampai bertahun-tahun setelah lokasi telah ditutup. Panjang periode jeda saat DAL terlihat akan muncul dari WRD merupakan fungsi dari laju oksidasi, terdapatnya bahan penetral, dan tingkat pembasahan dari timbunan mengarah ke transportasi produk oksidasi dengan lingkungan eksternal.

Sebagian besar insiden curah hujan (dari urutan 50-90%; Williams & Rohde 2008) menginfiltrasi WRD segar (tidak ditutupi), dan banyak dari infiltrasi pada awalnya tersimpan dalam tumpukan. Tumpukan hanya akan jenuh ke titik di mana permeabilitas batuan sisa cukup tinggi untuk memungkinkan aliran membentuk jari-jari (jari-menjari/tumpang tindih) sepanjang jalur yang disukai (dari sekitar 25% jenuh untuk batuan sisa segar untuk sekitar 60% untuk batuan sisa lapuk; Williams & Rohde 2007). Akhirnya, jari-jari mencapai dasar tumpukan dan lancar meresap ke fondasi ataupun mengalir sepanjang saluran drainase yang terpendam dan sungai kecil yang muncul pada titik-titik yang rendah di sepanjang kaki dari tumpukan. Semakin berkembang jari yang membasahi, semakin rendah curah hujan berikutnya diperlukan untuk menghasilkan rembesan ke dasar tumpukan, dan rembesan akan lebih cepat terjadi.

Laju pembasahan konvensional timbunan-akhir WRD akibat infiltrasi curah hujan merupakan fungsi dari jumlah dan intensitas curah hujan dari waktu ke waktu, laju kenaikan dan tinggi tumpukan, distribusi ukuran partikel dari batuan sisa dan degradasi batuan sisa dari waktu ke waktu. Ini akan berkisar dari tahun-tahun untuk tumpukan rendah pada iklim basah hingga berpuluh-puluh tahun (atau lebih) untuk tumpukan tinggi dalam iklim kering. Waktu yang diperlukan untuk pembasahan menentukan kapan DAL mulai dilepas ke lingkungan.

6.1.4 Metode konstruksi WRD untuk meminimalkan hasil DAL

Berbeda dengan timbunan-akhir, timbunan paddock memfasilitasi pembangunan WRD dari bawah ke atas. Istilah 'bottom-up' juga digunakan untuk menggambarkan proses membangun WRD tersebut dengan mengendapkan lapisan horisontal daripada dengan timbunan-akhir dari ditinggikan dari tip-head.

Konstruksi di atas permukaan tanah dari WRD adalah komponen utama dari praktik kerja unggulan untuk pengendalian DAL. Metode ini membatasi pemisahan bahan halus dan kasar selama penempatan dan memfasilitasi penempatan selektif dan pemadatan, sehingga membatasi gerakan gas dalam timbunan dan luasnya zona berpotensi pengoksidasian.

Konstruksi di atas permukaan tanah adalah metode yang paling efektif kedua (setelah air penutup permanen) untuk pengelolaan batuan sisa sulfida yang sangat reaktif dan secara substansial mengurangi risiko DAL di pit tambang terbuka dengan dominasi batuan sisa PAF dan tidak cukup batuan sisa NAF dan/atau AC untuk enkapsulasi.

Biaya metode konstruksi ini dibandingkan dengan timbunan-akhir dari tip-head tinggi adalah spesifik-lokasi, karena tergantung pada penjadwalan tambang, topografi dan jarak pengangkutan (haul). Jika konstruksi atas tanah yang dipilih dari awal sebagai strategi pengelolaan batuan sisa, berdasarkan hasil penilaian risiko DAL, jadwal pengembangan tambang dapat dioptimalkan terbaik untuk menampung kebutuhan spesifik dari metode ini. Namun, jika di kemudian hari strategi pembuangan limbah harus diubah untuk mengatasi masalah yang berkembang yang ditimbulkan oleh batuan sisa reaktif (termasuk kebutuhan untuk pengolahan DAL), biaya cenderung jauh lebih tinggi dan pengendalian DAL secara keseluruhan kurang efektif daripada menerapkan pendekatan pembangunan di atas tanah dari awal.

Pembangunan di atas tanah dengan penimbunan paddock di atas lapisan tipis, diikuti dengan penyebaran dan pemadatan batuan sisa, memiliki manfaat praktis utama:

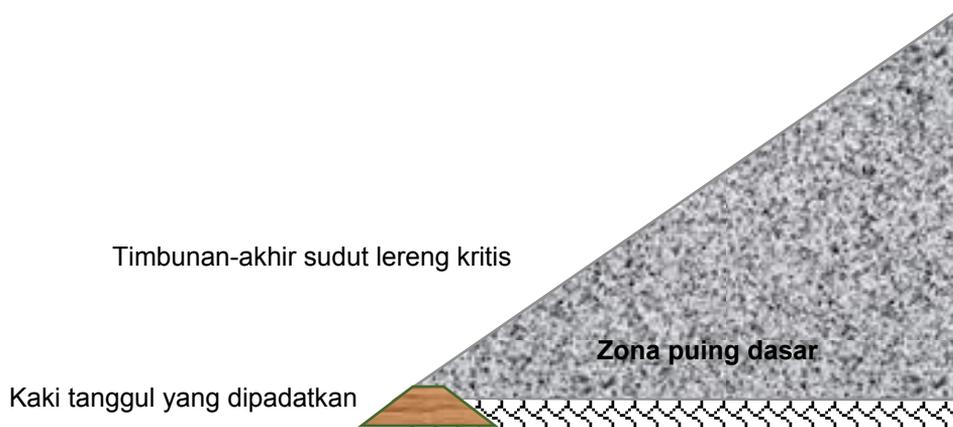
- Massa kerapatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan timbunan-akhir dari tip head mengurangi kebutuhan volume penyimpanan.
- Masuknya oksigen dan perkolasi bersih ke batuan sisa PAF sangat berkurang, mengurangi potensi pembakaran spontan dan DAL.
- Waktu yang tersedia untuk memanfaatkan penetral kinetik berkapasitas lambat dari batuan silikat dimaksimalkan dengan meningkatkan waktu tinggalnya air.
- Daya kandungan yang lebih besar dari batuan sisa meningkatkan potensi pembangunan pasca-penutupan.
- Sangat mengurangi penyelesaian pasca-konstruksi, termasuk runtuhnya dari beratnya sendiri pada pembasahan dan degradasi diinduksi pemukiman, juga meningkatkan kemungkinan keberhasilan pasca-penutupan.

Penyumbatan zona puing dasar

Pendekatan pembangunan di atas tanah juga dapat digunakan untuk menutup zona dasar reruntuhan yang terbentuk pada timbunan-akhir batuan sisa dari tip-head, dan untuk menyumbat lereng datar WRD atau penyumbatan melawan sudut lereng kritis WRD. Teknik yang diuraikan dalam bagian ini (diperlihatkan dalam angka 22 hingga 24) sama dengan yang rutin digunakan untuk konstruksi teknik sipil dari tanah dan batuan pengisi bendungan. Untuk saat ini, penerapannya ke WRD tambang sudah langka. Namun, penerapannya relatif mudah dan dapat menghasilkan manfaat yang besar dalam mengurangi oksidasi batuan sisa sulfida dan mencegah DAL, asalkan bahan liat yang sesuai tersedia untuk pembangunan lapisan penyumbatan dipadatkan.

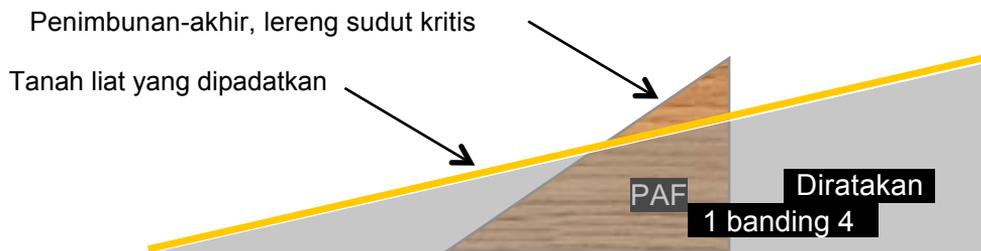
Paddock penimbunan batuan sisa awalnya sering digunakan sebagai jejak WRD dikembangkan, sebelum memulai timbunan-akhir setelah penetapan tip-kepala. Namun, pembuangan-akhir selanjutnya dari tip-head menciptakan zona dasar puing-puing dan sudut kasar dari sudut lereng kritis. Jika itu sudah terjadi, zona puing dasar dapat disumbat dengan membangun tanggul batuan sisa NAF dan/atau ANC atau tanah liat sekitar ujung tiang yang dipadatkan (Gambar 22). Namun, ini perlu diperluas karena tumpukan mengembang dan tanggul yang dilanda oleh luapan batuan sisa yang mengalir turun lereng dari atas.

Gambar 22: Skema kaki tanggul yang dipadatkan untuk menyumbat zona puing dasar



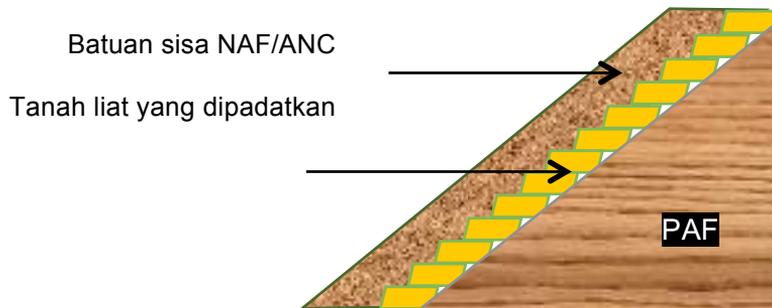
Jika bahan liat yang sesuai tersedia, dapat dibangun lapisan tanah liat yang dipadatkan terhadap kemiringan WRD yang bermuatan batuan sisa PAF untuk menutup masuknya oksigen dan infiltrasi curah hujan. Hal ini dapat dicapai pertama dengan perataan lereng sudut kritis WRD dan kemudian membangun bangunan horisontal di atas tanah dengan lapisan tanah liat yang dipadatkan langsung di lereng rata (Gambar 23), ataupun dengan membangun lapisan tanah liat yang dipadatkan yang cenderung condong ke lereng sudut kritis WRD yang bermuatan batuan sisa PAF (Gambar 24). Sedangkan metode terakhir ini secara rutin digunakan untuk membangun inti tanah liat di tanah dan batuan pengisi bendungan pasokan air, belum umum diadopsi oleh industri pertambangan.

Gambar 23: Skema tanah liat lapisan dipadatkan di atas lereng WRD yang diratakan yang bermuatan batuan sisa PAF.



Dalam hal ini, panjang lereng yang condong untuk lereng sudut kritis WRD akan menjadi sekitar tiga kali lebih kecil dari lereng rata dengan 1 banding 4, mengurangi luas jejak akhir WRD, berpotensi mengurangi volume tanah liat yang dibutuhkan, dan mengurangi biaya pekerjaan tanah. Selain itu, meningkatkan lapisan tanah liat yang dipadatkan dalam serangkaian pengangkatan horisontal memungkinkan pemadatan yang lebih baik yang dapat dicapai dalam 1 dalam 4 lereng, dan lebih mudah untuk menempatkan material menggunakan pendekatan ini jika menggunakan peralatan kecil yang cocok. Lapisan miring tanah liat yang dipadatkan masih harus dilindungi dari erosi dengan menambahkan lapisan NAF dan/atau sisa batu ANC (Gambar 24). Lapisan ini dapat ditempatkan dengan biaya yang efektif dengan ketebalan yang diinginkan dengan membuangnya dari puncak. Berat tambahan dari lapisan pelindung memadatkan bagian yang condong dari lapisan tanah liat.

Gambar 24: Skema lapisan tanah liat yang dipadatkan di atas tanah condong ke lereng sudut kritis WRD yang bermuatan batuan sisa PAF



Perhatikan bahwa kemiringan merata dari lereng sudut kritis (sekitar 37°) ke 1 banding 4 (14°) membuat panjang (daerah tangkapan air) dari lereng sekitar tiga kali lebih besar, mengingat bahwa ketinggian WRD adalah tetap. Namun, masih akan sulit untuk mencapai pemadatan yang baik dari tanah liat di lereng yang relatif curam. Kemiringan merata juga menghaluskan tekstur permukaan, meningkatkan limpasan dan karenanya potensi erosi. Oleh karena itu, lapisan tanah liat yang dipadatkan di lereng rata membutuhkan lapisan atas batuan sisa kasar NAF dan/atau batuan sisa ANC untuk ditempatkan di atasnya untuk perlindungan erosi.

Dalam kedua kasus (Gambar 23 and 24), lapisan tanah liat yang dipadatkan juga harus diterapkan pada permukaan atas terakhir dari tumpukan guna mengurangi peresapan oksigen dan infiltrasi curah hujan ke dalam batuan sisa PAF di bawahnya.

6.1.5 Meminimalkan pemanasan-spontan dan potensi DAL

Pelacakan lokasi batuan sisa sulfida yang sangat reaktif di dalam lubang dan penempatannya di WRD sangat penting, karena bahan yang mungkin berpotensi untuk pemanasan-spontan serta hasil DAL. Perawatan yang baik sekali juga harus dilaksanakan dengan penempatan tailing sulfida yang sangat reaktif dalam massa batuan sisa tak jenuh, seperti luas permukaan tinggi rasio volume bahan ini dapat memperburuk pemanasan spontan dan potensi pembentukan DAL.

Oksidasi sulfida adalah reaksi eksotermis (menghasilkan panas). Untuk batuan sisa sulfida yang sangat reaktif tingkat pemanasan dapat cukup untuk menyebabkan ignisi-spontan, disertai uap, SO_2 (yang menggabungkan dengan kelembaban untuk membentuk asam sulfur), dan tetap stabil (di mana bahan karbon dikonsumsi oleh pembakaran) atau berombak (karena produk oksidasi menempati volume yang lebih besar). Untuk bahan sangat reaktif yang terpapar, potensi penyalaan-spontan diminimalisir dengan pendinginan atmosfer, yang dicapai dengan penimbunan paddock di lapisan tipis. Namun, sementara mengurangi kenaikan suhu, pendekatan ini akan meningkatkan produksi DAL kecuali mengimplimentasikan metode penempatan khusus.

Untuk bahan jenis ini, potensi DAL diatasi terbaik dengan enkapsulasi dalam sel guna membatasi masuknya oksigen maupun perkolasi bersih (net) air, sehingga mengurangi pembentukan dan transportasi hasil oksidasi. Pemanasan-spontan dan produksi DAL dapat dikurangi secara gabungan oleh penimbunan paddock, penyebaran dan pemadatan selang-seling lapisan yang batuan sisa sulfida sangat reaktif dan batuan sisa NAF dan/atau batuan sisa AC dalam sel yang dibangun dari batuan sisa NAF dan/atau batuan sisa AC (Landers & Usher 2015). Hal ini membatasi potensi pemanasan dengan membatasi ketebalan setiap lapisan reaktif dan potensi DAL dengan mengenkapsulasi lapisan sulfida yang sangat reaktif. Dengan tidak adanya batuan sisa AC yang cukup, bijaksanalah untuk menambahkan kapur atau batuan kapur hancur ke NAF dan/atau batuan sisa PAF untuk menyediakan kapasitas alkali penyangga sementara bahan terpapar.

Pembuangan bawah air adalah cara yang paling efektif membatasi masuknya oksigen tetapi sulit untuk dicapai selama operasi, terutama pada iklim kering. Salah satu pilihan adalah menempatkan batuan sisa sulfida di lubang yang telah selesai yang tersedia, sebaiknya di mana pada akhirnya akan berada di bawah air tanah atau di tingkat danau pit yang dipulihkan. Perendaman akan secara efektif menghentikan proses oksidasi. Namun, batuan sisa PAF harus ditutupi oleh air sebelum sempat untuk secara signifikan mengoksidasi, atau jika tidak akan terdapat risiko berikutnya kontaminasi air tanah oleh uraian hasil oksidasi. Sekali lagi, proses penimbunan paddock di dalam pit dengan penutup pelapis yang berselang-seling (interlayer) oleh bahan NAF atau terutama ANC yang dipadatkan mengurangi risiko dalam situ hasil formasi pelarutan oksidasi in situ sebelum bahan ditutup dengan air.

Pilihan kedua adalah membangun sebuah pembendungan batuan sisa yang dibangun di mana ketinggian muka air dinaikkan karena kedalaman batuan sisa PAF yang sangat meningkat selama operasi LoM.³⁸

6.1.6 Minimisasi risiko DAL di lokasi yang didominasi oleh batuan sisa PAF

Di lokasi tambang terbuka dengan proporsi yang tinggi batuan sisa PAF atau muatan keseluruhan zat terlarut tinggi batuan sisa AMD atau pada tahap tertentu pertambangan, mungkin terdapat cukup batuan sisa NAF dan/ atau batuan sisa AC yang memadai untuk mengenkapsulasi batuan sisa PAF. Dalam kasus tersebut, bahkan lebih penting untuk sebelumnya mengidentifikasi jenis batuan sisa dengan derajat yang berbeda dari potensi pembentuk asam dan secara selektif menempatkan tipe-tipe tersebut di dalam WRD atau di bawah air.

Batuan sisa paling sangat reaktif akan terbaik jika ditempatkan di bawah air, mungkin dalam TSF, asalkan TSF awalnya dirancang atau mampu diperluas untuk mengakomodasikan jumlah kedua jenis limbah yang akan diproduksi.³⁹ Metode konstruksi atas tanah melibatkan penimbunan paddock, penyebaran dan pemadatan, seperti dijelaskan di atas, harus digunakan untuk sisa batuan sisa yang sangat PAF.

Kedua batuan sisa yang paling reaktif PAF harus terkandung dalam pusat WRD atau digunakan untuk menunjang tanggul TSF, menggunakan desain yang tepat untuk pembendungan material.⁴⁰ Selanjutnya batuan sisa PAF yang kurang reaktif harus ditempatkan dalam lapisan yang dipadatkan dari bawah ke atas, dengan batuan sisa PAF yang sedikit-reaktif yang terkandung di bawah lereng luar. Sementara strategi ini mengurangi besarnya masalah DAL di lokasi sebanyak mungkin, tidak ada jaminan bahwa jumlah AMD yang mungkin masih diproduksi akan memungkinkan lokasi untuk memenuhi persyaratan pengelolaan lingkungan tanpa mitigasi lebih lanjut, seperti pengolahan.

38 Lihat studi kasus tambang Kelian dalam Bagian 3 untuk contoh implementasi proses penutupan progresif ini.

39 Lihat studi kasus Phu Kam dalam bagian ini dan studi kasus Kelian di Bagian 3.

40 Lihat studi kasus tambang Martha dan Phu Kham dalam bagian ini.

Studi Kasus 6: Pemantauan jangka panjang menunjukkan keberhasilan pembangunan di atas tanah untuk menampung batuan sisa, Martha Mine, Selandia Baru

Konteks

Tambang Martha menghasilkan emas dan terletak di kota pedesaan kecil Waihi di Selandia Baru. Waihi memiliki iklim sedang dengan curah hujan tahunan rata-rata 2.135 mm. Suhu rata-rata bulanan berkisar antara 10°C dan 19°C dan curah hujan bulanan bervariasi antara 120 dan 240 mm sepanjang tahun.

Pertambangan menghasilkan batuan sisa PAF dan batuan sisa NAF. Antara tahun 1988 hingga 1999, batuan sisa yang dilepaskan di tanggul khusus direayasa diintegrasikan ke dalam TSF dikenal sebagai Penyimpanan 2. Tujuan kinerja utama untuk tanggul Penyimpanan 2 adalah mengurangi laju oksidasi kandungan-sulfida batuan sisa dan produksi asam dan sulfat pada pelindian, netralisasi asam yang dihasilkan dan pengendalian kuantitas dan kualitas air yang meninggalkan batuan sisa.

Penelitian ini mendokumentasikan desain dan konstruksi tanggul untuk meminimalkan produksi DAL sejak awal. Temuan dari lebih dari 10 tahun data pemantauan memperlihatkan bahwa strategi telah sukses. Rincian lebih lanjut dan referensi ke sumber data asli yang tercantum dalam Garvie et al. (2012).

Karakteristik batuan sisa

Meskipun penyelidikan geokimia awal dilakukan antara tahun 1984 hingga 1986 sebelum dimulainya pertambangan, pekerjaan karakterisasi berikutnya dan pengalaman lokasi mengidentifikasi kebutuhan untuk mengurangi laju pembentukan DAL dalam batuan sisa PAF dan pelepasan lindi DAL dari tambang. Pekerjaan tambahan uji geokimia dimulai pada tahun 1993 dan berlanjut sampai Penyimpanan 2 selesai pada tahun 1999.

Batuan sisa yang sebagian teroksidasi dan tidak teroksidasi bermuatan sejumlah variabel sulfida sulfur (kebanyakan pirit) dengan kisaran 0,5-3% berat dan nilai rata-rata 1,5% berat S. Jumlah sulfat larut dalam batuan sisa sebelum penambangan bertingkat rendah. Batuan sisa yang sebagian teroksidasi yang hampir seluruhnya kurang dalam sulfida sulfur dan diklasifikasikan sebagai NAF. Kriteria sebagai berikut dikembangkan dan diterapkan untuk karakteristik potensi limbah DAL:

- NAF: NAPP negatif dan NAGpH $\geq 4,5$
- PAF: NAPP positif dan NAGpH $< 4,5$
- Tidak pasti: hasil NAPP dan NAG berlawanan.

Material awalnya diklasifikasikan sebagai tidak pasti diasumsikan sebagai PAF, sambil menunggu hasil dari uji kerja tambahan.

Pengendalian DAL

Pengendalian DAL dilaksanakan dengan menggunakan empat pendekatan:

- pengendalian hidrologi—penempatan lapisan permeabilitas tingkat rendah untuk mengurangi infiltrasi, dan pemasangan struktur pengelolaan air untuk mengendalikan tingkat pelepasan
- pengolahan air—modifikasi kimiawi drainase

- pengendalian geokimia penambahan menetralkan bahan untuk mengendalikan tingkat pH dan oksidasi
- pengendalian oksidasi mengurangi fluks oksigen ke sulfida reaktif.

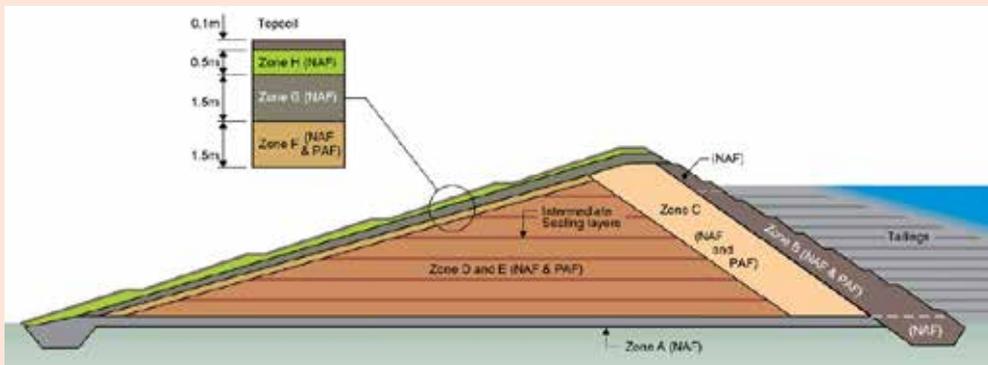
Desain tanggul dan penempatan batuan sisa

Tanggul dari Penyimpanan 2 dibangun dari batuan sisa yang digali selama penambangan. Untuk memenuhi persyaratan kekuatan struktural, retensi tailing dan pengendalian DAL, desain struktur tanggul mencakup berbagai zona dengan sifat tertentu. Zona D berisi sebagian besar batuan sisa (Gambar 1). Sekitar 60% dari batuan sisa di zona D tidak teroksidasi dan 40% telah teroksidasi. Zona E terdiri dari butiran lembut dan basah yang teroksidasi dan batuan yang tidak teroksidasi yang ditempatkan sebagai sub-kompartemen zona D.

Prosedur penanganan khusus diimplementasikan untuk bahan zona D, guna mengurangi oksidasi mineral sulfida dan produksi kemasaman. Misalnya, permukaan bahan PAF yang langsung terpapar ke atmosfer terbatas pada kompartemen-kompartemen tidak lebih besar dari 4 ha di area dan tidak lebih dari ketinggian 5 m. Perantara lapisan encapsulasi setebal 0,25 m yang dipadatkan dengan permeabilitas tingkat rendah ditempatkan di permukaan untuk terpapar selama lebih dari 3 bulan. Setelah zona D selesai, tiga lapisan bahan (zona F, G dan H) yang ditempatkan di atas ruang bahu luar zona D (Gambar 1). Hal ini dilakukan untuk mengurangi transportasi oksigen dari atmosfer ke batuan sisa, guna menyediakan sarana untuk pertumbuhan tanaman yang sesuai dan untuk mencegah erosi.

Zona F adalah lapisan transisi antara batuan kasar di zona D dan tanah berbutiran halus di zona G. Ini terdiri dari kedua batuan sisa, yang teroksidasi dan yang tak teroksidasi, yang dipadatkan di lift dengan ketinggian dari 0,25 m. Zona G adalah lapisan penutup batuan sisa NAF setebal 1,5 m berbutiran halus yang teroksidasi, yang fungsinya untuk membatasi transportasi oksigen di atmosfer ke dalam batuan sisa. Lapisan penutup tersebut ditempatkan di bangunan yang dipadatkan di atas tanah tidak lebih besar dari 0,25 m untuk mencapai konduktivitas hidrolik jenuh kurang dari 1×10^{-8} m/s, dengan saturasi diukur lebih besar dari 90%.

Zona H adalah lapisan yang dirancang untuk mendukung vegetasi dan mengurangi erosi. Zona H dibangun dari batuan sisa NAF teroksidasi yang sedikit dipadatkan. Zona B adalah wajah struktural hulu tanggul. Zona C adalah zona struktural batuan teroksidasi dan tidak teroksidasi.



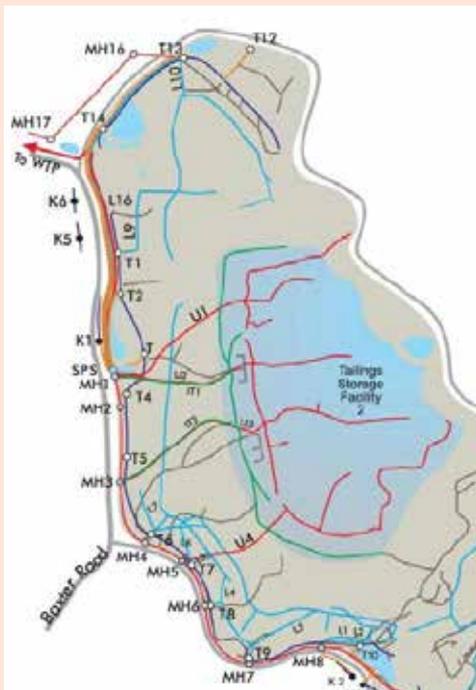
Gambar 1: Desain penampang tanggul Penyimpanan 2, didesain untuk bersinggungan dalam tailing.

Pengendalian hidrologi dan pengolahan air

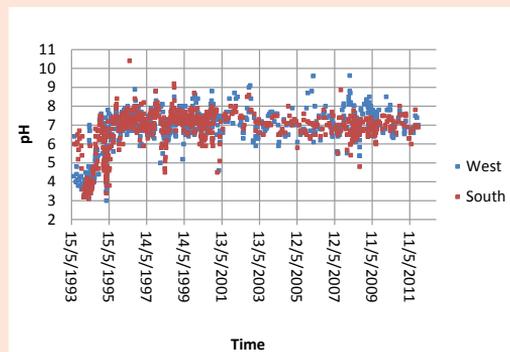
Pengendalian hidrologi dicapai melalui kombinasi dari bahan pilihan, penempatan dan pemadatan (seperti dijelaskan di atas), dan jaringan saluran air dan kolam penampungan. Jaringan saluran air dipasang di Penyimpanan 2 untuk menampung air dari tailing, zona D, lapisan tanah bawah tanggul dan air tanah alami diperlihatkan pada Gambar 2. Saluran air lindi dibangun untuk mencegah dan menampung lindi dari dalam zona D yang ditunjuk dengan pengidentifikasi yang dimulai dengan huruf 'L' pada Gambar 2. Gambar 2 juga memperlihatkan permukaan kolam penampung air.

Pengendalian geokimia

Hancuran kapur diterapkan pada permukaan zona D, untuk memperpanjang jeda waktu untuk produksi DAL dari batuan PAF, untuk waktu yang lebih panjang dari yang dibutuhkan guna menempatkan lapisan zona G. Penerapan hancuran kapur, dan penyumbatan oleh pemadatan dan penempatan zona G dan H, dimulai pada bulan Mei 1994. Fasilitas tersebut beroperasi penuh pada tahun 1995. Nilai pH diukur dalam dua kolam air permukaan mengkonfirmasi bahwa tingkat aplikasi ini hampir selalu cukup untuk keadaan netral ke permukaan air alkali (Gambar 3). Penambahan kapur diaktifkan memungkinkan pelepasan langsung limpasan curah hujan dari kolam penampungan sejak bulan Juli 2014, dengan penghematan yang signifikan pada biaya pengolahan air.



Gambar 2. Jaringan drainase Penyimpanan 2



Gambar 3: Nilai-nilai pH dalam kolam-kolam penampungan selatan dan barat

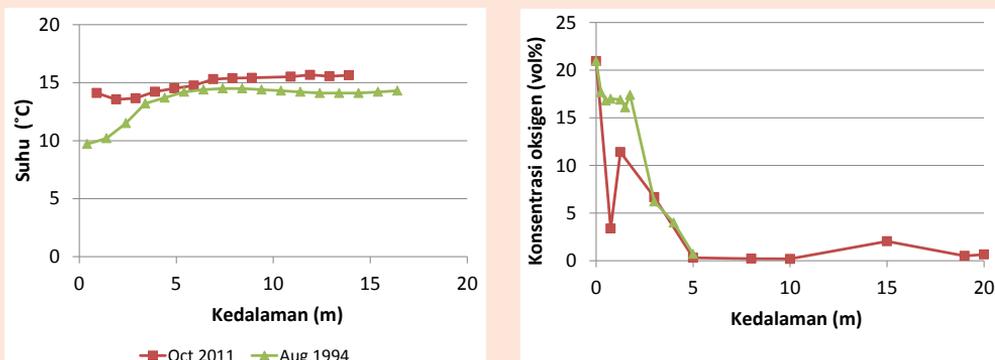
Pengendalian oksidasi

Penutup permukaan untuk tanggul Penyimpanan 2 dirancang untuk mengurangi transportasi oksigen dengan difusi, konveksi dan adveksi dari permukaan tanggul pada interior.

Waihi Gold melakukan program jaminan kualitas yang ketat sampai dengan bulan November 1998; kemudian sebuah lembaga pengujian independen melakukan program jaminan kualitas mengkonfirmasi bahwa karakteristik material ditentukan untuk membatasi transportasi oksigen secara konsisten dicapai selama konstruksi. Spesifikasi konstruksi memerlukan rata-rata 10-uji konduktivitas hidrolik jenuh dari zona G menjadi kurang dari 10^{-9} m/s dan derajat kejenuhan lebih besar dari atau sama dengan 90% atau lebih besar dari 85% untuk uji tunggal. Frekuensi pengujian adalah salah satu uji konduktivitas hidrolik untuk setiap 20.000 m³ zona G dan 20 uji tingkat saturasi per hektar untuk setiap lapisan urukan. Zona G juga diperlukan untuk memenuhi kriteria rongga udara (10 uji rata-rata tidak lebih dari 8% dan uji tunggal tidak lebih besar dari 10%) dan ditempatkan dengan kadar air yang akan memungkinkan pemadatan optimal.

Nilai konduktivitas hidrolik yang diukur umumnya di kisaran 1×10^{-9} m/s untuk 1×10^{-8} m/s, dan derajat kejenuhan adalah sekitar 0,9, memperlihatkan kedua parameter desain utama tersebut telah dicapai. Derajat kejenuhan konsisten dengan nilai-nilai koefisien difusi oksigen dari zona G yang diukur di tempat, yang memiliki nilai perwakilan $1,5 \times 10^{-8}$ m²/s.

Sepuluh lubang penyelidikan vertikal dipasang di Penyimpanan 2 pada tahun 1994 yang digunakan untuk mengukur profil konsentrasi oksigen dan suhu vertikal. Pengukuran ini diulang pada tahun 2011. Hasil yang dipilih diperlihatkan pada Gambar 4. Konsentrasi oksigen yang diukur pada tahun 2011 mirip dengan yang diukur pada tahun 1994. Biasanya, konsentrasi oksigen menurun dengan cepat dengan jarak dari konsentrasi permukaan (21% volume). Di beberapa lokasi konsentrasi oksigen kurang dari atau sama dengan 1% volume dalam 5 m dari permukaan dan dalam 3 m dari dasar zona G. Gradien suhu nol bawah sekitar 3 m di kedalaman, memperlihatkan bahwa laju oksidasi sekitar nol. Hasil yang sama diperoleh untuk lubang penyelidikan lain.



Gambar 4: Pengukuran suhu dan konsentrasi oksigen di lubang penyelidikan W108

Laju pembentukan asam sulfat pemodelan memperlihatkan bahwa zona G mengurangi laju lebih dari 95% dibandingkan dengan jika tanpa lapisan penutup. Konsentrasi sulfat pada pelindian yang dikumpulkan oleh 14 saluran air di zona D berkisar antara 100 dan 5.500 mg/L dan semuanya jauh lebih sedikit daripada konsentrasi maksimum yang diprediksikan untuk air pori sebelum penerapan lapisan penutup, dengan asumsi tidak ada pengendalian kelarutan sulfat.

Kesimpulan

Karakterisasi bahan awal, pengembangan dan pelaksanaan rencana pembangunan yang digelar dengan tujuan pengelolaan DAL yang jelas dan kepatuhan terhadap program bahan kontrol kualitas yang ketat selama konstruksi tanggul telah menjadi kunci untuk mempertahankan produksi asam sulfat bertingkat rendah dari batuan sisa PAF yang terbenyung di Martha Mine selama lebih dari 17 tahun. Penggunaan lapisan penutup tengah antara lift bahan masam terbatas PAF dan produksi sulfat selama konstruksi tanggul, dan penambahan kapur menyangga asam yang dibentuk sampai penempatan penutup akhir, sehingga pelepasan langsung dari curah hujan dimungkinkan. Lapisan penutup akhir yang terdiri dari batuan sisa teroksidasi yang dipadatkan di tanggul Penyimpanan 2 telah mengurangi laju asam dan sulfat dari muatan sulfida batuan sisa di bawahnya lebih dari 95% dibandingkan dengan limbah PAF yang terungkap. Lapisan penutup efektif karena memiliki koefisien difusi oksigen bertingkat rendah sekitar $1,5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}^{-1}$.

REFERENSI

Garvie, A, Miller, S, Fransen, P, Ruddock, J, Haymont, R (2012). 'Early and prolonged limitation of AMD production via waste landform construction', in Price, WA, Hogan, C, Tremblay, G (eds), Proceedings of the 9th International Conference on Acid Rock Drainage, 20–26 May 2012, Ottawa, Ontario, Canada.

Studi kasus 7: Pembangunan WRD dengan pemadatan progresif antara lift-lift, tambang PanAust, Laos

Konteks

Phu Bia Mining Limited (90% dimiliki oleh PanAust Limited dan 10% oleh Pemerintah Laos) menugaskan Operasi Tembaga–Emas Phu Kham pada tahun 2008. Lokasi ini terletak di sekitar sebelah utara 120 km dari Vientiane dan terletak di dalam DAS Nam Mo River. Curah hujan rata-rata sekitar 3.000 mm/tahun, dengan musim hujan dan kering yang jelas berbeda.

Tambang terbuka Phu Kham ditambang sebagai operasi truk dan sekop konvensional. Sekitar 200 Mt batuan sisa akan ditambang dalam LoM tambang sampai tahun 2021. Bijih diproses dengan flotasi untuk menghasilkan konsentrasi tembaga-emas.

Evaluasi risiko DAL yang terkait dengan pengembangan cadangan Phu Kham mulai sebelum penambangan, dengan dimasukkannya uji sulfur sebagai komponen integral dari penyelidikan geologi dan proyek serta pemodelan. Data pra-penambangan memperlihatkan bahwa flotasi tailing akan menjadi PAF dengan muatan sulfur pirit tinggi sekitar 7% S. Rata-rata kadar sulfur batuan sisa di dalam shell pit diperlihatkan menjadi 3,2% S, dengan 20% dari proyeksi batuan memiliki kadar sulfur lebih dari 5% S. ANC pada umumnya rendah dan kurang dari 15 kg H₂SO₄/t.

Berdasarkan data pra-penambangan, blok pemodelan memperlihatkan bahwa sekitar 75% dari batuan sisa itu mungkin PAF. Akibatnya, deposit Phu Kham diakui sebagai salah satu lokasi risiko DAL yang tertinggi di seluruh dunia. Situasi ini menyoroti kebutuhan untuk pengelolaan terpadu tailing dan batuan sisa untuk mengurangi risiko DAL dalam rencana LoM.

Istilah ARD (bukan DAL) digunakan untuk sisa studi kasus ini karena pekerjaan karakteristik awal memperlihatkan potensi yang tinggi drainase asam batuan bahan tambang.

Rencana pengelolaan ARD

Sebuah tim multidisiplin yang terdiri dari perwakilan dari departemen geologi, pertambangan, pengolahan dan lingkungan dalam hubungannya dengan konsultan eksternal didirikan sebelum tambang dimulai untuk mengembangkan rencana pengelolaan ARD bagi kehidupan tambang. Tim mengevaluasi berbagai pilihan, termasuk WRD bekas pit dan penempatan semua limbah PAF bawah air di fasilitas penyimpanan tailing (TSF). Pilihan strategi terakhir adalah untuk mengenkapsulasi batuan PAF ber kapasitas lebih rendah di bagian hilir tanggul TSF dan tempat batuan PAF dengan kapasitas yang lebih tinggi di TSF, di mana akan semakin dibanjiri dengan air TSF. Tim mengembangkan pedoman operasional yang rinci yang memungkinkan praktik pengelolaan ARD digabungkan ke dalam kegiatan operasi sehari-hari, dengan tujuan keseluruhan untuk mencegah warisan geokimia dari batuan sisa dan tailing di Phu Kham. Sebuah komite ARD didirikan guna memastikan pelaksanaan rencana, dengan peran yang sedang berlangsung untuk memberikan tinjauan rutin dan rekomendasi di seluruh tahap operasi dan dalam penutupan.

Rencana pengelolaan ARD didasarkan pada strategi fundamental mengisolasi limbah tambang sulfida dari oksigen atmosfer. Pilihan teknik untuk mencapai isolasi dari oksigen atmosfer termasuk menempatkan bahan sulfida di bawah lapisan air penutup permanen atau pembangunan sumbat rekayasa yang membatasi perpindahan oksigen ke tingkat geologi. Di Phu Kham, kedua strategi telah diadopsi, dengan limbah pembentuk asam sulfida yang lebih tinggi masuk ke pembendungan tailing dan limbah pembentuk asam sulfida yang lebih tinggi diisolasikan dalam sel dan zona (sel PAF) di dalam bagian hilir TSF.

Sistem kode warna 'lalu lintas' yang sederhana digunakan untuk memetakan dan memisahkan limbah menjadi empat tipe utama, berlabel biru, hijau, amber (oranye kekuningan) dan merah. Hijau dan biru non-asam yang membentuk (NAF); biru juga menetralkan asam, dengan kapasitas penetralan asam tinggi (ANC). Amber dan merah keduanya PAF, dengan potongan sulfur untuk amber diatur untuk memastikan agar bahan yang ditempatkan di sel PAF memenuhi spesifikasi desain untuk kadar sulfur. Rincian lebih lanjut dari pengembangan skema klasifikasi terdapat dalam Miller et al. (2012).

Kriteria saat ini yang digunakan untuk pengendalian kadar batuan sisa sebagai berikut:

- hijau (NAF): sulfur $\leq 0.3\%$ S
- amber (oranye kekuningan) (PAF): sulfur 0,3 to 5% S
- merah (PAF): sulfur total $>5\%$ S
- biru (bahan penetral asam)
 - batu kapur; ATAU
 - $\%S \leq 0,5\%$ S dan ANC ≥ 100 kg/t; ATAU
 - $\%S > 0,5\%$ S dan ANC/MPA > 4 .

Pengendalian tingkat pengeboran yang dilakukan sebelum penambangan mendorong perencanaan jangka pendek untuk penambangan biji maupun limbah. Blok limbah dikarakterisasi, ditandai di dalam pit, dan kemudian dijadwalkan ke dalam konstruksi tanggul TSF (hijau dan amber) atau disimpan dalam TSF. Semua materi merah dan amber melampaui persyaratan konstruksi TSF dikelola dalam TSF. Operasi penambangan menggunakan waktu nyata, peralatan manajemen perangkat lunak berbasis GPS untuk memungkinkan limbah (dan bijih) blok untuk dikirim ke tujuan yang benar berbasis truk demi truk.

Desain sel PAF

Sel-sel PAF adalah campuran hijau, amber dan bahan yang diekstraksi dari pit borrow (urukan) di dalam dan di sekitar TSF jejak akhir. Cut-off sulfur untuk klasifikasi amber diatur untuk memastikan campuran memenuhi spesifikasi desain berikut untuk kadar sulfur dalam sel PAF:

- Rata-rata total muatan sulfur bulanan tidak lebih dari 1,5% S
- 90% dari sampel bulanan kurang dari 2,5% S.

Di tambang start-up, spesifikasi desain yang ditetapkan pada rata-rata S kadar 1% S dan persentil ke-90 dari 2% S. Nilai-nilai ini semakin meningkat berdasarkan hasil pemantauan kinerja sel PAF.

Gambar 1 adalah foto udara memperlihatkan pengaturan umum dari sel PAF dalam tanggul dan lokasi WRD dalam TSF. Awalnya WRD menerima limbah hanya merah, tapi seperti pertambangan telah berkembang dengan meningkatnya jumlah limbah hijau yang dibutuhkan untuk pembangunan tanggul, sebagian besar limbah amber sekarang juga melaporkan ke WRD dalam TSF. Timbunan disebut sebagai limbah pembuangan jalan merah (RRWD).

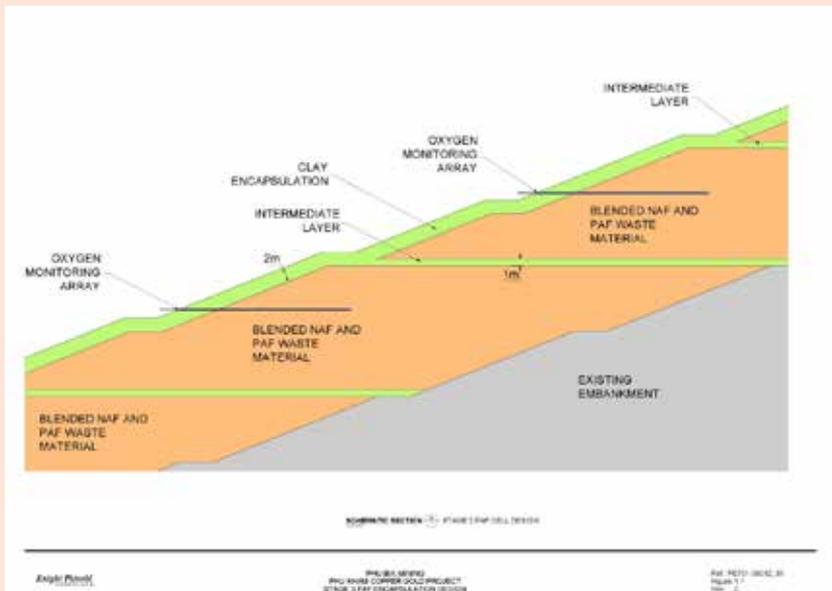


Gambar 1: Tanggul TSF memperlihatkan lokasi sel PAF di bagian hilir dari dinding bendungan dan Timbunan Limbah Jalan Merah yang terletak di dalam daerah tangkapan TSF

Gambar 2 adalah skema penampang yang memperlihatkan desain sel dan enkapsulasi lapisan PAF. Juga diperlihatkan lokasi dan rancangan oxygen-monitoring array (alat pemantau kualitas oksigen) yang merupakan bagian dari program pemantauan operasional yang luas.

Gambar 3 memperlihatkan konstruksi aktif sel PAF dan lapisan enkapsulasi. Lapisan enkapsulasi memberi penutup horizontal 6 m dan tegak lurus 2 m di atas bahan PAF. Bahan amber, hijau dan borrow ditempatkan di sel PAF diangkut ke luar dari truk-truk penimbunan dan campuran dozer, ditempatkan di lapisan setebal 300 mm untuk memudahkan pencampuran dan pepadatan oleh mesin seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3. Zona enkapsulasi juga dibangun di lapisan setebal 300 mm, tetapi hanya tipe bahan hijau dan amber yang digunakan dan dipadatkan dengan spesifikasi yang ketat, termasuk kerapatan minimal 98% dari standar maksimal pada kadar air setara dengan derajat kejenuhan tidak kurang dari 90%.

Derajat kejenuhan di tempat materi tersebut ditempatkan dan dipadatkan sangat penting untuk efektivitas lapisan enkapsulasi guna mengurangi fluks oksigen ke limbah PAF. Membangun kedua zona PAF dan lapisan enkapsulasi pada kadar air yang tinggi secara substansial mengurangi kemampuan oksigen untuk menyebar melalui ruang pori tak jenuh.



Gambar 2: Desain enkapsulasi sel PAF menunjukkan posisi umum pemantauan oksigen array



Gambar 3: Bangunan sel PAF di muka hilir tanggul TSF

Untuk mengevaluasi kinerja sel PAF, alat pemantauan gas pori oksigen array dipasang horizontal selagi sel-sel dibangun. Posisi umum dari baris horizontal diperlihatkan pada Gambar 2; Gambar 4 memperlihatkan instalasi aktif. Tabung oksigen pemantauan terletak pada interval 2 m melalui 10 m pertama dari limbah PAF, kemudian pada 15 m dan 20 m ke dalam sel PAF. Sebuah sumbat grout bentonit terletak di seberang persinggungan antara lapisan enkapsulasi dan sel PAF, dan urukan berpermeabilitas rendah yang dipadatkan digunakan antara masing-masing port pengambilan sampel dalam sel PAF.

Vibrating wire piezometers (VWP) dipasang untuk memantau tekanan pori di tanggul untuk tujuan geoteknik. Alat ini juga memberikan catatan suhu di titik pemantauan secara terus menerus, yang kemudian digunakan untuk menilai setiap oksidasi sulfida historis atau berkelanjutan dalam sel PAF.



Gambar 4: Pemasangan sistem pemantauan gas pori horizontal

Timbunan Sampah Merah

Timbunan Sampah Merah (Red Waste Dump (RWD)) terletak di dalam pembendungan tailing (lihat Gambar 1) dan dibanjiri secara progresif seiring dengan naiknya ketinggian muka air TSF. Asam dan logam larut (termasuk Fe, Al dan Cu) yang dihasilkan dan dilepaskan dari batuan PAF sementara, di atas, ketinggian muka air bercampur dengan kolam air alkalin TSF, di mana asam dinetralkan dan logam diendapkan.

RWD ini dibangun dengan metode penimbunan dorong, dengan truk ungu pendek dan bahan didoze di mukanya. Karena sifat butiran halus dari banyak batuan sisa dan ketinggian rendah di atas permukaan air TSF, metode penempatan telah ini mencegah perkembangan konvektif/adveksi perpindahan gas dalam timbunan, membatasi oksidasi lapisan permukaan langsung. Penentuan pH pasta di pit dalam penyelidikan uji pit dalam RRWD memperlihatkan pH rendah dan oksidasi terjadi hanya di lapisan permukaan langsung. Bahan di kedalaman memperlihatkan tidak ada bukti oksidasi in situ.

Kebasaan cairan (liquour) tailing dilepaskan ke bendungan dan air balik dipantau setiap hari untuk memastikan agar kebasaaan terlarut dalam bendungan ditargetkan berada di atas 30 mg CaCO₃/L. Kapur tambahan ditambahkan di pabrik untuk pelepasan tailing guna memberikan tingkat kebasaaan pelindung untuk penyangga masukan asam dari batuan terpapar selama pembangunan RRWD serta setiap masukan asam dari pengeringan pit.

Pada penutupan, RWD akan secara permanen di bawah air untuk mencegah oksidasi dan asam yang terus berlanjut.

Jaminan kualitas dan pemantauan kinerja

Klasifikasi limbah di dalam pit

Sampel bangku tambang secara bulanan rutin diuji untuk jumlah S, ANC, C, Cu dan NAG. Hasilnya digunakan untuk mengkonfirmasi klasifikasi dan pemetaan jenis batuan sisa (hijau, biru, amber dan merah) di dalam pit. Semua data dikumpulkan, dievaluasi dan disajikan dalam laporan bulanan, dan database yang sedang berlangsung dipelihara dengan lokasi sampel dan rincian login. Data ini digunakan untuk memperbarui model jenis batuan ARD dari lubang tambang guna memfasilitasi perencanaan tambang jangka pendek untuk penambangan dan pemisahan jenis batuan ARD yang terseleksi untuk penempatan di tanggul TSF dan RRWD.

Pemantauan geoteknik sel-sel PAF dan lapisan-lapisan enkapsulasi

Pemantauan geoteknik selesai pada semua bahan enkapsulasi yang ditempatkan sesuai dengan kebutuhan pengujian. Hasil uji dilaporkan kepada tim konstruksi setelah selesai untuk memberikan umpan balik pada kualitas konstruksi. Pada akhir setiap bulan semua data disusun dan didokumentasikan dalam laporan untuk mencatat sejarah konstruksi.

Sebuah spesifikasi konstruksi geoteknik telah diproduksi untuk semua zona dalam tanggul TSF. Spesifikasi ini memberikan persyaratan batas ukuran partikel, batas Atterberg, serta pemadatan dan kadar air untuk penempatan bahan dalam sel PAF dan bahan yang dapat digunakan untuk pembangunan lapisan enkapsulasi.

Data pengujian untuk bahan yang ditempatkan dalam sel PAF memperlihatkan bahwa tingkat tinggi pemadatan telah dicapai. Rata-rata pemadatan untuk semua uji disamakan dengan kerapatan 99,9% dari standar kerapatan kering maksimal, yang berada di atas minimum yang ditentukan dari 98%.

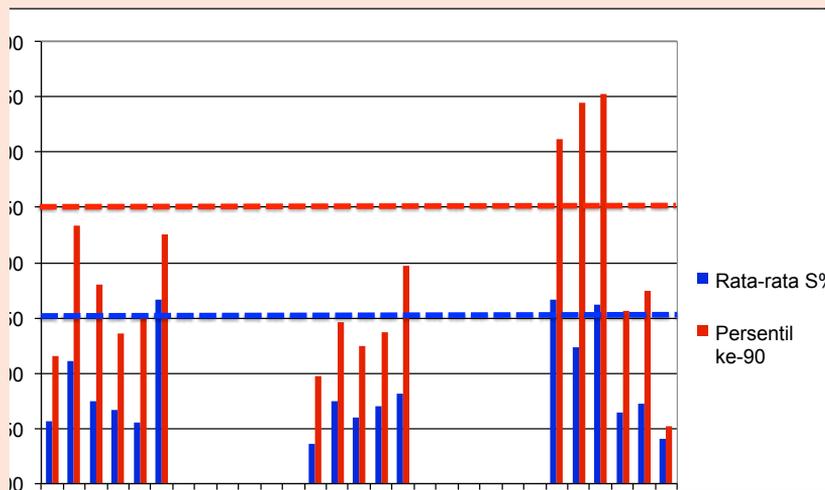
Untuk membatasi oksidasi bahan ditempatkan dalam sel PAF, zona enkapsulasi dibangun di batas luar sel PAF. Data lapangan untuk bahan enkapsulasi memperlihatkan bahwa tingkat tinggi pemadatan (99,8% dari standar kerapatan kering maksimal) dan tingkat tinggi kejenuhan (tingkat rata-rata kejenuhan 93,6%) telah tercapai.

Pemantauan geokimia sel-sel PAF

Setiap kenaikan 1 m sel PAF dijadikan sampel pada grid 50 m dengan kedalaman 1 m. Sampel yang diuji sulfur total, ANC dan NAG (NAG pH dan NAG kapasitas kg/t).

Gambar 5 adalah plot dari rata-rata dan persentil ke-90 dari pemantauan data sulfur bulanan untuk sel PAF pada tahap konstruksi 3, 4 dan 5. Perhatikan bahwa pembangunan sel-sel ini terjadi hanya pada musim kemarau dan setiap sel selesai sebelum musim hujan. Setiap bulan mendekati kenaikan 1-2 m di sel PAF, dan nilai-nilai persentase S ini digunakan untuk mengevaluasi kinerja. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa untuk tahap 5, yang rata-rata bulanan kadar sulfur untuk 3 bulan pertama dekat dengan atau sedikit melebihi nilai target. Masalah ini disorot dengan bahan segregasi dalam lubang. Masalah tersebut diatasi dan hasil 3 bulan terakhir melampaui target.

Disimpulkan bahwa waktu singkat limbah sulfur yang lebih tinggi ini tidak mungkin telah mengganggu kinerja sel PAF karena tingginya tingkat pemadatan dan saturasi yang tercapai. Selain itu, bagian tanggul akan dilapisi penutup dalam tahap-tahap konstruksi selanjutnya. Seri waktu data ini ini memperlihatkan kebutuhan untuk rajin mengendalikan kualitas dan mengadakan tinjauan sistem/audit berkala guna memastikan target desain untuk semua komponen dari rencana pengelolaan ARD dipenuhi secara berkelanjutan.

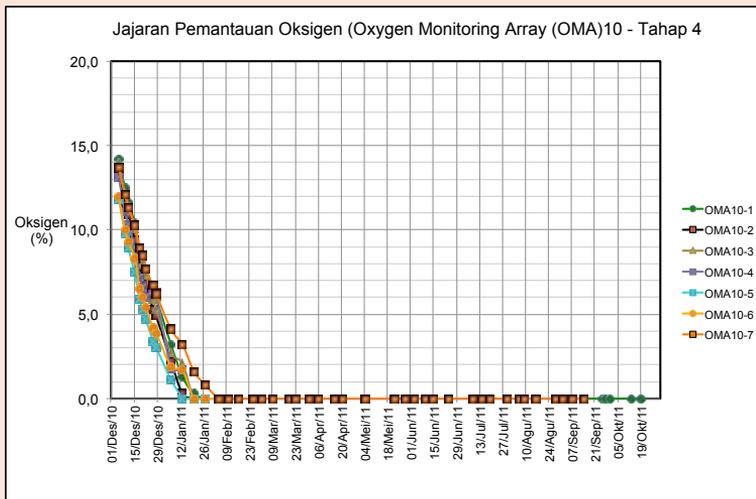


Gambar 5: Nilai persentil sulfur rata-rata dan persentil ke-90 bulanan untuk sampel sel PAF (garis putus-putus menunjukkan target rata-rata target dan persentil ke-90)

Profil konsentrasi oksigen dan tren seiring waktu yang diperlihatkan pada Gambar 6 untuk salah satu jajaran pemantauan oksigen (oxygen-monitoring arrays) (OMA 10) dari tahap 4 konstruksi. Tiga puluh lima jajaran telah dipasang untuk saat ini, dan masing-masing lokasi memperlihatkan kecenderungan yang sama, dengan konsentrasi oksigen menurun ke nol dalam waktu 1-4 bulan. Tingkat penetral oksigen memperlihatkan bahwa bahan sel PAF memiliki laju oksidasi intrinsik mulai dari $1,0 \times 10^{-8}$ untuk $4 \times 10^{-7} \text{ kgO}_2/\text{m}^3/\text{detik}$. Angka ini khas reaktif batuan PAF dan mengkonfirmasi kebutuhan untuk pengelolaan limbah yang terfokus dan rajin.

Vibrating wire piezometer memberikan catatan suhu yang terus-menerus. Tren suhu melewati waktu yang konsisten dengan suhu harian rata-rata tahunan di PhuKham. Tidak ada sumber panas lainnya di dalam sel PAF—seperti oksidasi pirit, yang merupakan reaksi eksotermis—terbukti jelas ada.

Hal ini mendukung temuan dari data pemantauan oksigen yang memperlihatkan bahwa oksidasi secara efektif dikendalikan dalam sel PAF.



Gambar 6: Tren konsentrasi pori gas sel oksigen PAF (port 1 (OMA10-1) terjauh dari penyumbatan lapisan dan port 7 berdekatan dengan penyumbatan lapisan)

Drainase tanggul TSF diarahkan melalui torehan V bendungan di mana aliran ini terus dimonitor dan sampel air dikumpulkan mingguan. Rembesan TSF telah tetap circum-pH netral (median 6,6) dengan kebasan total tinggi (berarti 127 mgCaCO₃/L) dan sulfat yang rendah (rata-rata 63 mg/L).

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa pedoman pelepasan telah terpenuhi di tingkat persentil ke-99. Konstituen terlarut dominan dalam rembesan adalah Ca, Mg dan sulfat. Karena potensi redoks rendah, rembesan bermuatan beberapa zat besi terlarut (rata-rata 0,33 mg/L) dan mangan (rata-rata 3.3mg/L). Mn awalnya disorot sebagai unsur utama yang menjadi perhatian untuk pelepasan ke Nam Mo. Untuk mengatasi masalah ini, PBM memasang sistem pengolahan lahan basah yang terdiri dari aliran sel isian batu untuk penghapusan Mn oksidatif.

Kesimpulan

Lokasi Phu Kham menyajikan tantangan yang signifikan untuk mengelola limbah, dengan proporsi yang tinggi dari bahan PAF di tempat curam, curah hujan tinggi dan lingkungan yang sensitif. Identifikasi risiko awal sebelum penambangan dan integrasi persyaratan geokimia untuk pembendungan dengan rencana tambang yang memungkinkan PBM untuk mengelola ARD selama operasi tanpa efek samping yang signifikan. Kunci keberhasilan rencana pengelolaan telah menerbitkan kesadaran di seluruh perusahaan terhadap risiko yang terkait dengan tingginya proporsi limbah PAF dan manajemen operasional yang rajin dengan audit rutin serta kajian teknis melalui struktur komite formal.

Pemantauan kinerja yang komprehensif memperlihatkan bahwa dengan desain yang baik, pemantauan terfokus dan pengelolaan sehari-hari, risiko ARD dapat dikelola dengan cara yang hemat biaya dari awal operasi. Strategi pengelolaan yang telah dilaksanakan selama operasi akan terus bekerja sampai pasca-penutupan guna meminimalkan risiko ARD di masa depan.

REFERENSI

Miller, SD, Rowles, T, Millgate, J, Morris, L, Pellicer, J, Gaunt, J (2012). 'Integrated acid rock drainage management at the Phu Kham Copper Gold Operation in Lao PDR', *Proceedings of the Ninth International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, 20–26 May 2012, Ottawa ON, Canada.

6.2 Pengelolaan tailing untuk meminimalkan DAL

6.2.1 Ikhtisar

Tidak satu pun solusi tunggal yang ada untuk pengelolaan tailing yang aman, mengingat berbagai macam kondisi spesifik lokasi lingkungan, jenis bijih, geokimia, topografi dan kendala lainnya. Namun, pilihan pengelolaan tailing yang diusulkan harus meminimalkan interaksi antara tailing dan lingkungan setempat untuk mencegah asam, zat terlarut pelindian dan potensi dampak ke air permukaan dan air tanah selama operasi dan setelah penutupan.

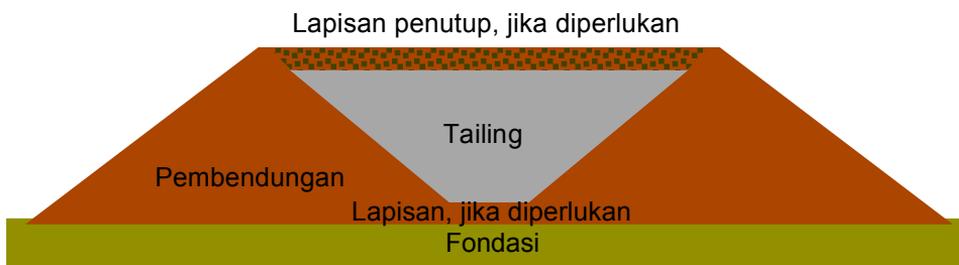
Rincian lengkap masalah yang terlibat dalam deposisi dan penyimpanan tailing serta penutupan TSF terdapat *Pengelolaan tailing* dalam seri buku pegangan ini (DIIS 2016e). Bagian ini berfokus pada aspek-aspek tertentu dari pengelolaan tailing yang meminimalkan risiko DAL masa depan yang ditimbulkan oleh tailing.

Tailing yang terkait dengan produksi emas dan logam dasar secara konvensional telah disimpan dalam keadaan basah (jenuh) selama masa operasi tambang, dan sering pada pH basa karena penambahan kapur untuk memfasilitasi flotasi dan/atau ekstraksi dari target mineral. Dengan demikian, terlepas dari lapisan permukaan tailing pantai terpapar atmosfer, hanya ada risiko oksidasi mineral sulfida pengganggu (gangue) bertingkat rendah dalam sebagian besar massa tailing dan produksi akibat rembesan masam selama hidup operasional fasilitas. Meskipun ada gerakan ke arah penumpukan tailing dengan kadar air awal yang lebih rendah (misalnya, tailing kental atau tailing pasta) dan deposisi pusat untuk mencapai stabilitas yang lebih besar dan konsolidasi yang lebih baik, kadar air tailing tersebut masih cukup tinggi.

Potensi oksidasi tailing reaktif terutama didorong oleh difusi oksigen melalui permukaan kering tailing. Produk oksidasi kemudian dapat diangkut oleh air tailing dan/atau limpasan curah hujan dari permukaan tailing atau rembesan melalui tailing.

Karena tailing secara konvensional disimpan dalam bentuk bubur (pada berbagai konsentrasi padatan), penyimpanan permukaannya membutuhkan beberapa bendungan atau enkapsulasi (Gambar 25). Namun, bentuk enkapsulasi bervariasi. Perlu atau tidaknya lapisan dasar, tergantung pada kondisi tanah dan risiko yang ditimbulkan oleh air tailing.

Gambar 25: Enkapsulasi tailing reaktif



Pada tahap awal kehidupan tambang, dinding bendungan umumnya terdiri bahan borrow atau batuan lapuk ROM. Kemudian, mungkin melibatkan penggunaan penanganan ulang tailing, dengan perlindungan luar batuan sisa jinak dan/atau tanah. Dalam beberapa kasus, di mana kelebihan batuan sisa NAF dan/atau batuan sisa AC yang tersedia dan TSF di dekat lubang, perimeter TSF dapat dienkapsulasi (dicungkupkan) oleh lapisan tebal batuan ini. Proses ini memiliki keuntungan tambahan yaitu penyediaan penyangga terhadap kemungkinan hilangnya enkapsulasi melalui erosi di masa depan.

Tailing harus disimpan pada persentase kepadatan setinggi mungkin guna membatasi jumlah air pori yang tersedia untuk ditampung sebagai rembesan. Hal ini difasilitasi oleh penggunaan pengental berkadar tinggi atau teknologi tailing pasta. Pengeringan penguapan dengan memutar pengendapan tailing antara sel-sel, berpotensi dikombinasikan dengan susun kering, sedapat mungkin harus dimanfaatkan untuk membatasi rembesan selama operasi. Namun, strategi ini juga dapat memaparkan tailing sulfida pada oksidasi.

Dampak limpasan curah hujan yang berkelanjutan menyusul penutupan TSF perlu dipertimbangkan. Sebagai contoh, ini mungkin memerlukan pemasangan penutup permukaan perkolasi jaring rendah (lihat di bawah) untuk meminimalkan infiltrasi dan saluran tumpahan untuk pelepasan air guna meringankan kepala air yang jika tidak demikian akan mendorong secara vertikal rembesan air pori terkontaminasi atau menyebabkan bencana jebolnya dinding penahan.

Seperti disebutkan di atas, tailing disimpan secara konvensional dalam keadaan jenuh, yang kontras dengan batuan sisa, yang disimpan tak jenuh, sehingga meningkatkan laju oksidasi sulfida. Namun, setelah penghentian pengendapan tailing, permukaan freatik jatuh ke massa tailing, dan sejauh mana penampisan turun merupakan yang terbesar yang paling dekat dengan dinding bendungan di mana bahan yang paling kasar sering tersimpan. Proses desaturasi ini dapat mengekspos tailing ke oksigen dan oksidasi, dan produk oksidasi yang memerah ke bawah selama periode basah berturut-turut. Sehingga WRD dapat secara substansial tertinggal dalam TFL, tanda bahwa DAL jelas merembes dari dasar.

Beberapa strategi tersedia untuk mengurangi potensi tailing untuk menghasilkan DAL di masa depan, tergantung pada apakah tailing telah disimpan dalam bangunan TSF di atas tanah atau di bawah tanah di sebuah pit yang ditambang. Pilihan terakhir yang paling biasa tersedia di operasi multi-pit, di mana lubang pertama yang ditambang dapat menerima tailing yang dihasilkan dari bijih yang ditambang berikutnya. Namun, relokasi tailing dari TSF ke pit pada akhir pengolahan masih menjadi pilihan paling tepat untuk memastikan mitigasi jangka panjang dari risiko tinggi DAL di satu pit tambang.

Perhatikan bahwa komitmen untuk memindahkan tailing dari TSF ke pit pada akhir pengolahan jangan dianggap enteng. Jika operasi pit terbuka berkembang menjadi sebuah operasi bawah tanah, mungkin terdapat kapasitas cukup untuk penyimpanan tailing tambahan di lubang terbuka. Dalam hal ini, ada masih perlu TSF di atas tanah, meskipun ukurannya diperkecil, yang harus direhabilitasi dan yang mungkin memerlukan pengelolaan signifikan yang sedang berlangsung.

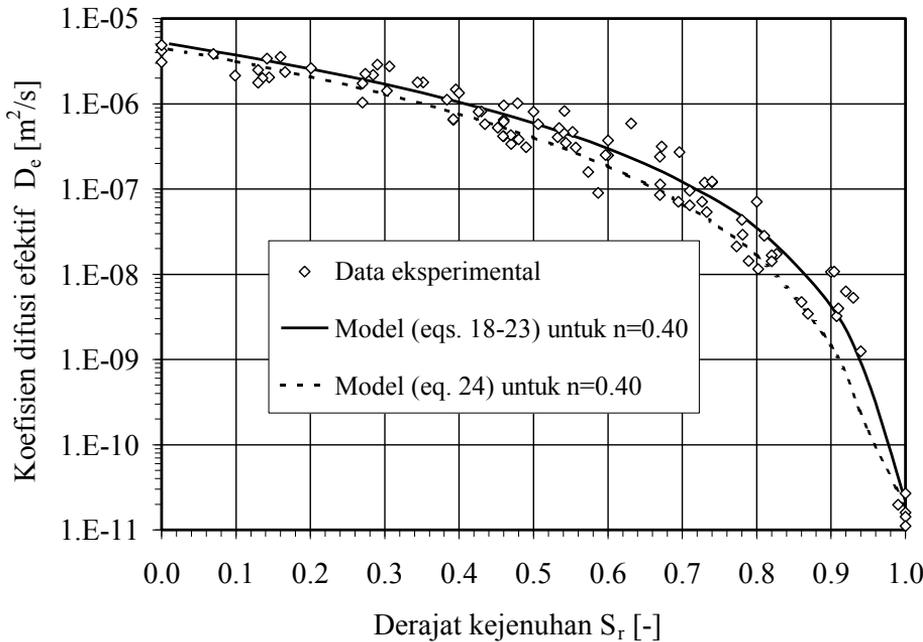
6.2.2 Lapisan air penutup untuk tailing

Tailing mungkin dapat dipertahankan di bawah lapisan air penutup untuk selamanya. Ada hubungan yang kuat antara derajat kejenuhan bahan butiran halus (seperti tailing) dan laju oksidasi sulfida (Dagenais et al 2006; Hutchinson & Brett 2006; Bussiere 2007). Tingkat difusi oksigen melalui air sekitar 10.000 kali lebih lambat dari udara. Hal ini menjelaskan mengapa lapisan air penutup begitu efektif dalam mengurangi laju oksidasi sulfida.

Gambar 26 mengilustrasikan hubungan antara koefisien difusi oksigen dan derajat kejenuhan untuk tanah atau media berpori. Difusi oksigen cepat menurun tiga atau empat kali lipat, dibandingkan dengan koefisien difusi oksigen dalam air, karena tingkat kenaikan saturasi di atas 85%. Dengan demikian, jika derajat kejenuhan dalam tailing dapat dipertahankan di atas 85%, laju oksidasi dapat dikurangi ke tingkat yang sama dengan tingkat yang dapat dicapai dengan menggunakan air penutup gratis selama tailing.

Jika strategi air penutup untuk dipertimbangkan untuk TSF atas tanah, operasi harus berada dalam zona iklim dengan neraca air tahunan positif yang menguntungkan, atau jika tidak, topografi harus sedemikian rupa sehingga air dari tangkapan lokal dapat ditampung untuk memelihara air penutup. Hal ini biasanya membutuhkan iklim neraca air bersih positif, umumnya membatasi penerapannya di Australia untuk Victoria, Tasmania dan daerah tropis basah. Lapisan air di atas tailing reaktif telah digunakan di Kanada (Ludgate et al. 2003), di daerah tropis khatulistiwa dan di bagian Australia yang beriklim sedang.

Gambar 26: Koefisien difusi terhadap derajat kejenuhan untuk media berpori



Sumber: from Bussière (2007).

Penimbunan lubang dengan tailing, di tempat bahan sulfida disimpan di bawah tingkat lapisan air tanah yang dipulihkan dan sisa lubang diisi dengan bahan tak berbahaya, memiliki keuntungan intrinsik berikut atas pilihan permukaan air bebas:

- Tailing akan ditutup dengan ketinggian muka air tanah yang melambung.
- Tampaknya tidak akan masalah dengan stabilitas jangka panjang dari struktur pembendungan.
- Strategi ini dapat digunakan selama rentang iklim yang lebih luas.

Berbeda dengan pilihan penimbunan pit, tanggul di sekitar TSF harus telah dibangun untuk menyediakan faktor yang cukup aman guna mengurangi risiko di kegagalan tanggul untuk tingkat-tingkat yang berterima di masa depan⁴¹

Agar efektif, lapisan air penutup membutuhkan topografi dan curah hujan untuk memberikan kedalaman air minimal 1,5-2 m, sebaiknya lebih, tergantung pada potensi untuk penanguhan kembali tailing berbutir halus reaktif oleh gerakan gelombang permukaan dan arus (Catalan & Yanful 2002). Semakin besar pembilasan tahunan lapisan air penutup dengan melalui aliran air dari lingkungan, semakin baik. Kelayakan strategi pengelolaan kualitas air jangka panjang ini ditentukan oleh lokasi topografi dan iklim.

Lapisan air penutup telah mapan sebagai praktik kerja unggulan terutama untuk bahan tailing tak teroksidasi jika dimungkinkan oleh geokimia, iklim, tangkapan dan neraca air bersih. Strategi ini tidak dianjurkan untuk limbah sulfida (tailing atau batuan sisa) yang telah cukup teroksidasi dan bermuatan banyak produk oksidasi mudah larut. Untuk bahan teroksidasi, penutup pembatas infiltrasi adalah pilihan yang lebih tepat.

Lapisan air penutup dapat menjadi solusi yang relatif tidak rumit dan solusi biaya efektif untuk bendungan tailing yang telah dibangun sebagai rekayasa struktur yang bermuatan air. Namun, sebagian besar pembendungan tailing dibangun sebagai fasilitas penyimpanan padatan yang tidak memiliki kapasitas menahan air terlalu lama. Lapisan air penutup di atas struktur tersebut dapat direkayasa, tetapi membutuhkan jauh lebih banyak usaha dan biaya serta mungkin perawatan bendungan yang dibangun sebagai struktur yang bermuatan air dengan faktor yang sesuai untuk keselamatan. Kegagalan mengupayakannya dan penyediaan biaya dapat mengakibatkan bencana kegagalan tanggul, seperti yang terjadi pada bulan Agustus 2014 pada tambang tembaga dan emas Mt Polley di Kanada (Pemerintah British Columbia 2015).

Sebuah sistem lapisan penutup hibrid—kolam permanen terletak di pusat dengan lapisan penutup anulus perifer ‘kering’—adalah pilihan yang dapat direkayasa untuk memastikan bahwa permukaan freatik dijaga agar cukup rendah di dekat dinding bendungan, yang tidak mungkin telah dibangun untuk standar penahan air, untuk memberikan faktor geoteknis yang cukup aman untuk keselamatan jangka panjang. Sistem penutup yang telah dipasang di tambang Henty di Tasmania adalah contoh pendekatan tersebut.⁴²

Sebuah lapisan air tanah yang ditinggikan (relatif terhadap permukaan tanah sekitarnya) dipertahankan dalam TSF closed-out juga dapat menjadi alternatif untuk lapisan air penutup jika kondisi-kondisi tertentu telah terpenuhi. Lapisan air tanah lebih rendah memfasilitasi faktor geoteknik yang cukup aman untuk struktur. Agar pilihan ini menjadi layak, sisa ANC dalam kolom tailing bawah lapisan air tanah harus cukup untuk lebih dari menetralkan semua kapasitas pembentuk potensi kemasaman di lapisan tailing tak jenuh yang tersisa di atas lapisan air tanah tersebut.

6.2.3 Lapisan penutup untuk tailing

Jika air penutup total atau sebagian tidak dapat dipertahankan, penempatan sistem penutup untuk membatasi infiltrasi air hujan dan/atau difusi oksigen akan dibutuhkan. Namun, sebagian konsolidasi massa tailing yang biasanya terdapat pada akhir periode operasi menimbulkan tantangan besar untuk desain dan penempatan sistem lapisan penutup.⁴³

41 Lihat studi kasus Benambra dalam buku pegangan praktik kerja unggulan *Pengelolaan tailing* (DIIS 2016e).

42 Lihat studi kasus dalam buku pegangan *Pengelolaan tailing* (DIIS 2006e).

43 Tantangan-tantangan tersebut dan cara-cara mengatasinya selama hidup operasional TSF diuraikan dalam buku pegangan *Pengelolaan tailing* (DIIS 2006e).

Dalam banyak kasus, bahan berbutiran halus yang bersumber dari tempat lain diusulkan sebagai salah satu komponen dari suatu sistem lapisan penutup untuk tailing dan batuan sisa. Menganggap bahwa bahan tersebut tersedia, ini umumnya memerlukan pit borrow untuk mengekstraksi volume yang seringkali cukup besar, dan konsekuensi kebutuhan untuk rehabilitasi jejak area borrow. Biaya untuk sumber bahan ini dapat sangat tinggi jika melibatkan jarak pengangkutan yang substansial.

Namun, tailing dan mungkin memang sifatnya berbutir halus dan mungkin memiliki banyak properti, selain konten sulfida tinggi, juga diperlukan untuk infiltrasi dan difusi oksigen yang efektif membatasi lapisan penutup. Kesadaran ini telah menyebabkan uji coba awal dan aplikasi skala penuh selanjutnya pada tailing yang telah desulfurisasi—yaitu, penyingkiran dengan sengaja sebagian besar sulfida (biasanya dengan flotasi buih, meskipun dalam beberapa kasus pemisahan gravitasi dapat menjadi pilihan) untuk menghasilkan produk yang dapat digunakan untuk penahanan/rehabilitasi progresif (misalnya, dalam TSF multi-sel) selama operasi. Memang, sistem tailing lumpur menyediakan metode hidrolik yang ideal untuk menyampaikan dan menempatkan seperti lapisan penutup tersebut (Duckett & O’Kane 2006).

Tailing yang telah dibersihkan dari sulfida digunakan untuk penempatan lapisan penutup pada operasi Inco Copper Cliff di Sudbury, Kanada (Hanton-Fong et al. 1997), dan tailing yang telah dibersihkan dari sulfida juga digunakan sebagai lapisan penutup akhir pada tambang timah Renison Bell di Tasmania.

Penerapan lapisan penutup tailing yang telah dibersihkan dari sulfida di Renison sangat didukung oleh pemodelan rinci transpor geokimia dan reaktif (Romano et al. 2002) dan terdapat dalam studi kasus dalam edisi pertama buku pegangan ini (Environment Australia 1997). Tambang ini sekarang dimiliki dan dioperasikan oleh Bluestone Mines Tasmania Joint Venture Pty Ltd. Pemantauan catatan kualitas air jangka panjang untuk titik rembesan utama bendungan dua tailing telah memberikan bukti yang baik untuk efektivitas sistem penutup ini. Penerapan tersebut dimulai pada tahun 90-an. Dibandingkan dengan tahun 1994, telah terjadi kenaikan pH tahunan rata-rata 4,1-5,7, pengurangan 10 kali lipat dalam kemasaman ($\text{mg CaCO}_3/\text{L}$) dan konsentrasi Fe dan Zn, pengurangan tiga kali lipat Mn dan pengurangan 24 kali lipat Al di rembesan. Berdasarkan tingkat pelepasan rembesan tersebut saat ini sekitar setengah dari tahun 1994, dapat dilihat telah ada pengurangan yang sangat besar dalam muatan logam dan asam tahunan.⁴⁴

Pembersihan tailing dari sulfida juga dapat diterapkan lebih luas untuk mengurangi risiko DAL bahan ini terhadap lingkungan. Studi kasus 8 menggambarkan seberapa efektif hal ini telah mengurangi masa depan warisan lingkungan dari sistem pembuangan tailing ke sungai di Papua New Guinea.

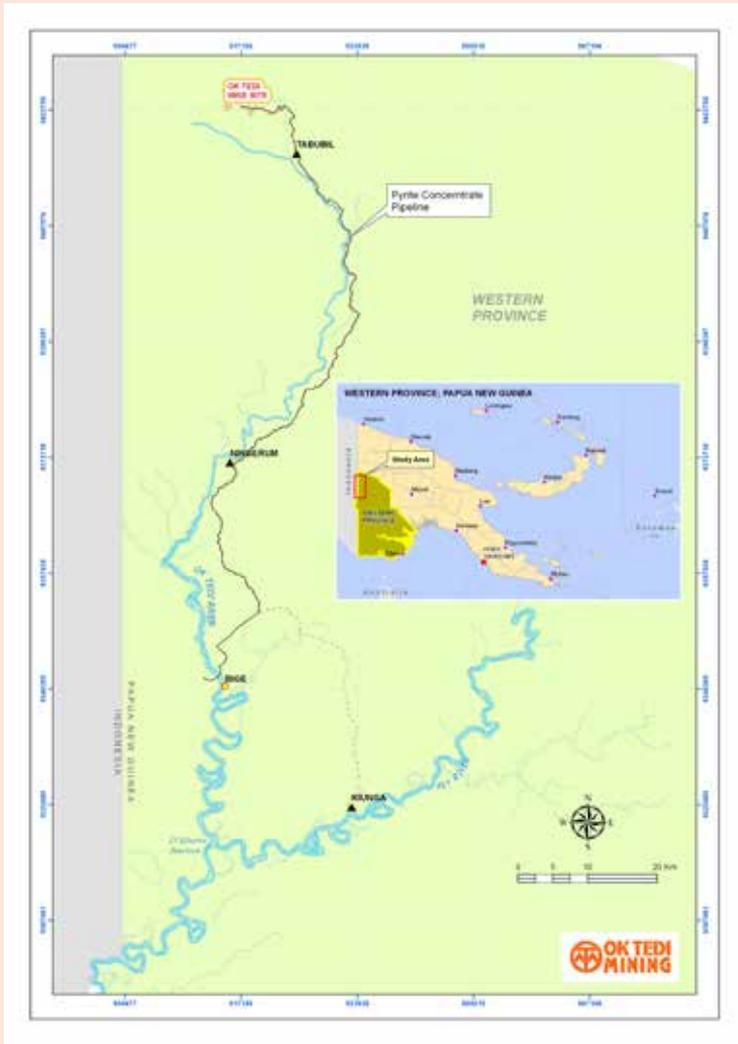
Terlepas dari opsi penutupan akhir yang dipilih, desain TSF praktik kerja unggulan untuk tailing yang bermuatan sulfida harus memperhitungkan kebutuhan untuk secara berkelanjutan mengoptimalkan saturasi (yaitu, konten air) dari massa tailing, sehingga integritas geokimia sebagian besar bahan dan integritas geoteknik struktur pembendungan dapat dipertahankan dalam jangka panjang.

⁴⁴ Informasi lebih lanjut tentang rehabilitasi tailing di Renison dalam studi kasus dalam buku pegangan praktik kerja unggulan baru-baru ini diterbitkan oleh Dewan Mineral Australia (MCA 2015b).

Studi kasus 8: Pembersihan tailing dari sulfida untuk meningkatkan prospek penutupan, tambang Ok Tedi, Papua Nugini

Konteks

Ok Tedi Mining Limited (OTML) mengoperasikan sebuah tambang tembaga dan emas besar di Star Mountains, Western Province, Papua Nugini. Kerumitan pengelolaan tailing di tambang Ok Tedi dikarenakan oleh ketidakmampuan untuk membangun TSF konvensional sekitar tambang. Akibatnya, tambang telah melakukan pembuangan tailing dari pabrik ke Ok Tedi (Ok artinya 'sungai' dalam bahasa masyarakat setempat), yang kemudian bertemu Fly River di persimpangan D'Albertis Junction sebelum akhirnya pelepasan melalui delta ke dalam Teluk Papua. Gambar 1 memperlihatkan lokasi tambang.



Gambar 1: Lokasi tambang Ok Tedi, fasilitas pembendungan bahan kerukan Bige dan konsentrat pirit (PCon)

Mitigasi dan risiko DAL sungai kecil tailing

Untuk mengurangi dampak pembuangan tailing ke sungai, OTML telah mengoperasikan pengerukan di Bige, sekitar 100 km hilir dari tambang, sejak tahun 1998. Pengerukan mengentaskan fraksi sebesar butiran pasir dari pabrik tailing (diperkirakan sekitar 70% dari tailing) selain pasir yang berasal dari penimbunan batuan sisa (WRD), erosi alam dan sedimen yang berasal dari penambangan yang sudah ada. Pada tahun 2014, 18,8 Mt pasir dikeruk dari sungai dan ditempatkan di stockpile yang direkayasa di kedua sisi dari Ok Tedi. Gambar 2 memperlihatkan beberapa pengaturan di daerah.

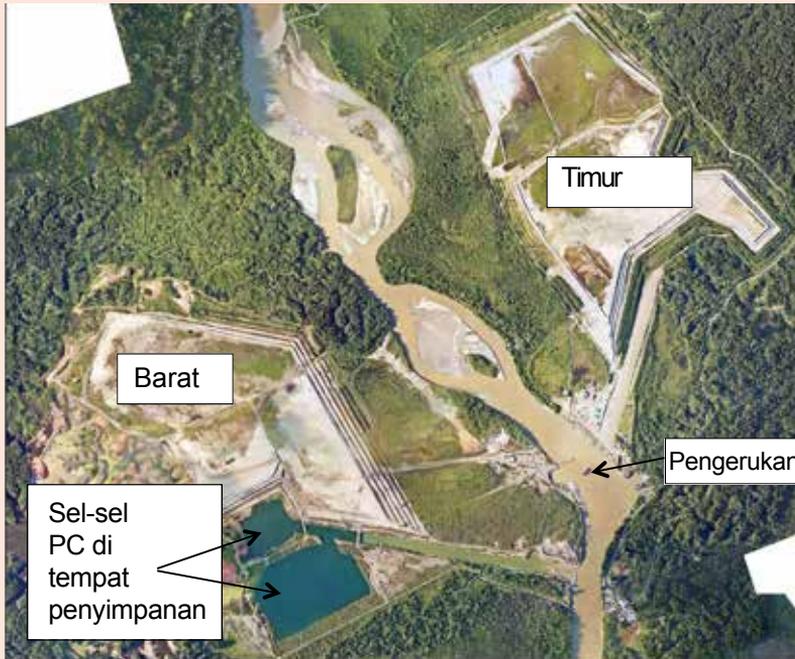


Figure 2: Foto pemandangan udara lokasi pengerukan Bige. Sungai Ok Tedi mengalir dari atas ke bawah. Terdapat stockpile di kedua sisi sungai, dengan penyimpanan sel-sel konsentrat pirit (PCon) di tepi barat

Pembuangan limbah ke sungai mengakibatkan risiko perkembangan DAL yang menumpuk sedimen dan bahan hasil kerukan di seberang kecuali diberlakukan tindakan pengendalian. Untungnya cadangan mineral Ok Tedi terletak di lingkungan yang didominasi oleh kapur. Dengan penambahan kapur yang lebih banyak ke WRD, dihasilkan ANC yang relatif tinggi dalam batuan sisa yang berasal dari sedimen di sungai.

Pada awal tahun 2000-an, manajemen OTML mengakui dari model blok bijih mereka bahwa kadar sulfur dalam pakan bijih dijadwalkan akan meningkat menjadi 8% terhadap proyeksi akhir LoM (saat itu pada tahun 2013, saat ini pada tahun 2026). Efek kenaikan ini seharusnya akan telah meningkatkan risiko DAL yang ada ke tingkat yang tidak berterima. Untuk mengendalikan risiko DAL yang berkembang, OTML melaksanakan proyek tailing limbah tambang (MWTP) pada tahun 2008.

MWTP terdiri dari pabrik pengolahan tailing yang mengolah tailing konsentrator tembaga untuk menyingkirkan pirit sebagai konsentrat (PCON) dan menghasilkan aliran tailing yang telah dibersihkan dari pirit dengan muatan rata-rata sulfur kurang dari 1% yang dilepaskan ke sungai. Pabrik pengolahan tailing (Gambar 3) dirancang untuk memproses lebih dari 20 Mt/a tailing yang akan memenuhi target ini untuk nilai pakan rata-rata sulfur hingga 8%. Total modal dan biaya operasi dari MWTP yang lebih besar dari US \$510 juta pada akhir tahun 2014.

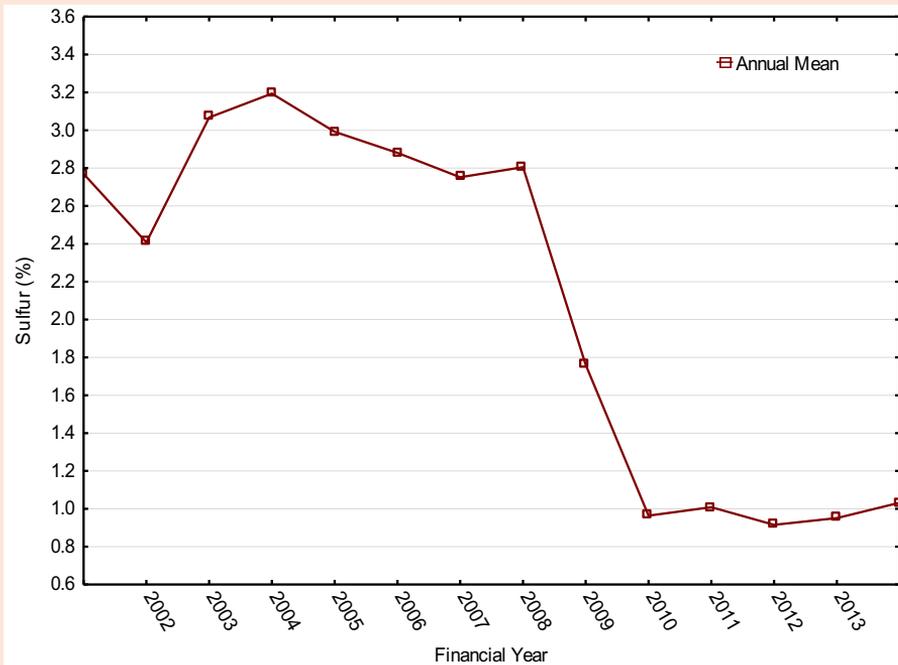


Gambar 3: Pabrik pengolahan tailing

PCon dikirim melalui jaringan pipa sepanjang 130 km ke Bige (Gambar 1), di mana bahan disimpan di bawah permukaan air alami di lubang yang dikeruk di tepi barat dari Ok Tedi (Gambar 2). Setelah lubang PCon dipenuhi, lalu ditutupi minimal dengan 12 m dari pasir NAF yang dikeruk. Pasir tebal penutup menaikkan tingkat lapisan air tanah alami dalam sel melalui proses penumpukan air tanah. Tingkat permukaan air dimodelkan dalam berbagai skenario curah hujan dan ditemukan lebih tinggi dari permukaan PCon yang disimpan dalam tahun terkering. Keadaan jenuh permanen akan memastikan isolasi jangka panjang PCon dari oksigen atmosfer dan dengan demikian mencegah oksidasi.

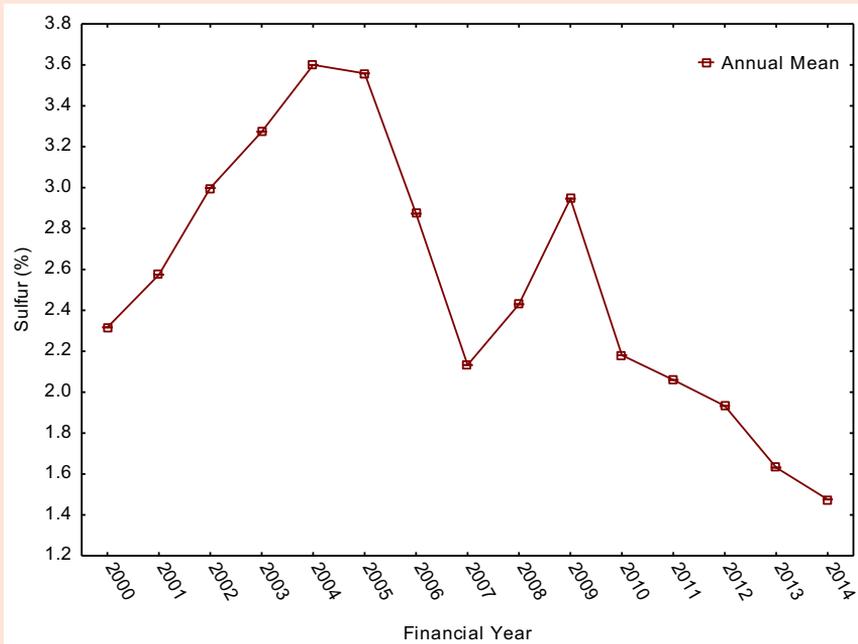
Pemantauan kinerja

Sejak pelaksanaan MWTP tersebut, telah terjadi penurunan tajam dalam muatan sulfur dari tailing yang dilepaskan, dengan target 1% yang telah secara konsisten dipenuhi secara tahunan rata-rata sejak tahun 2010 (Gambar 4).



Gambar 4: Konsentrasi sulfur seri waktu dalam tailing tahun keuangan 2000-01 hingga 2013-14

Lebih penting lagi, isi sedimen pirit dalam sistem sungai telah menurun sejak MWTP tersebut diterapkan. Stockpile pasir yang dikeruk di Bige merupakan potensial risiko DAL tertentu sebagai bahan yang relatif kasar dan pengeringan bebas dengan peningkatan kadar sulfur (3% sebelum pelaksanaan MWTP dan diproyeksikan akan terus naik hingga 8%). Dari tingkat 3% sebelum MWTP, nilai rata-rata di sedimen yang dikeruk telah dikurangi 1,5% untuk tahun 2013-14 (Gambar 5). Perlu dicatat bahwa konsentrasi sulfur di Bige telah memakan waktu beberapa tahun untuk menurun setelah awal pelepasan dari 1% tailing sulfida dari tambang. Alasan keterlambatan respons ialah karena bahan yang dikeruk di Bige terdiri dari campuran pelepasan tailing baru dan bahan dengan konsentrasi sulfur yang lebih tinggi yang telah masuk ke 130 km bentangan sungai hulu Bige, sebelum MWTP tersebut.



Gambar 5: Variasi konsentrasi sulfur dalam sedimen yang dikeruk pada tahun keuangan 2000-01 hingga 2013-14

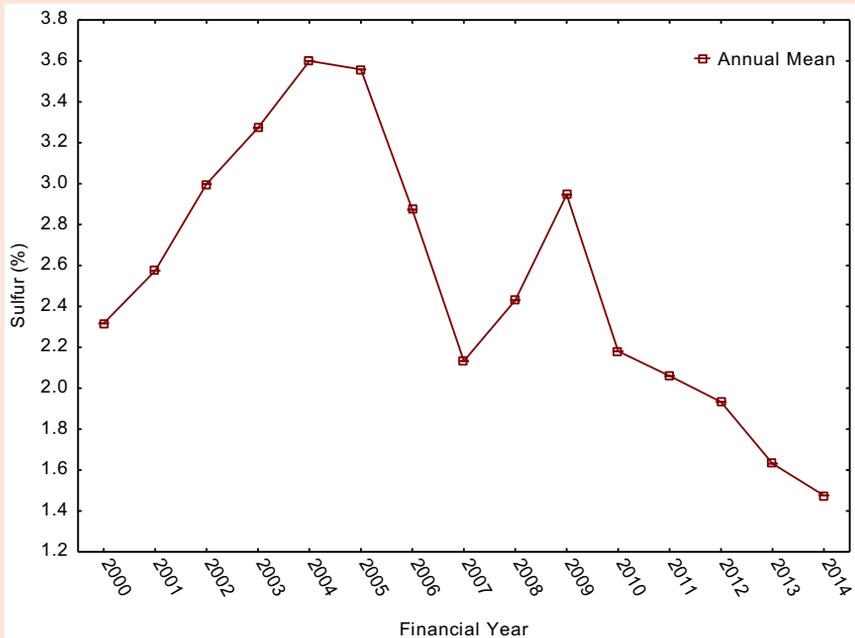
Selain membersihkan tailing dari pirit, OTML menambahkan kapur (dan karenanya ANC) ke sistem sungai. Hal ini dicapai melalui dua jalur:

- tambahan batuan kapur ke WRD yang gagal di lereng gunung yang curam dari sistem Ok Tedi bagian atas
- menambahkan (sejak 2011) sekitar 4.000 ton batuan kapur tambahan per hari melalui sirkuit penggilingan di konsentrator.

Dasar rasional untuk menambahkan kapur melalui pabrik adalah bahwa hal itu langsung menambah ANC untuk fraksi sedimen halus pada sistem sungai, termasuk bahan yang dikeruk di Bige dan sedimen yang diangkut lebih jauh ke hilir ke dataran banjir Ok Tedi.

Ukuran risiko DAL adalah rasio ANC ke MPA dihitung dari muatan pirit sedimen. Rasio ANC:MPA kurang dari 1 memperlihatkan probabilitas tinggi asam, sedangkan rasio lebih besar dari 1 memperlihatkan probabilitas yang lebih rendah dari asam. Semakin besar rasio ANC:MPA, semakin besar keyakinan bahwa asam bersih tidak akan terjadi di masa depan. Dalam kasus fraksi pasir (misalnya, bahan penutup di Bige) bersumber dari bijih dan limbah Ok Tedi, risiko pembentukan DAL dapat diabaikan di atas rasio ANC: MPA sebesar 1,5.

Kombinasi MWTP dan penambahan kapur telah memperlihatkan peningkatan yang nyata dalam rasio ANC:MPA bahan yang dikeruk sejak tahun 2004 (Gambar 6).



Gambar 6: Rasio ANC:MPA seri waktu dalam sedimen yang dikeruk di Bige dalam tahun keuangan sejak tahun 2000

Hal ini dapat dilihat bahwa rasio ANC:MPA telah meningkat dari rendah 0,6 dalam pada tahun 2004-05 menjadi 2,3 pada tahun 2013-14. Ini berarti bahwa bahan yang dikeruk di Bige saat ini dapat digunakan sebagai lapisan penutup NAF untuk penempatan di atas bahan PAF yang lebih tua dan OTML tersebut dapat merehabilitasi stockpile dengan relatif sedikit risiko hotspot (tempat-tempat) asam berkembang pada permukaannya yang tertutup.

Kesimpulan

Sementara pengalaman Ok Tedi merupakan hal yang tidak biasa karena penggunaan pembuangan tailing lewat sungai, dapat terlihat bahwa, melalui penerapan MWTP, dalam campuran dengan penambahan ekstra kapur ke WRD dan gilingan bijih, penurunan tajam telah dicapai dalam risiko DAL yang terkait dengan operasi tambang dan penutupan akhir. Penggunaan pembersihan sulfur dari tailing untuk mengurangi risiko DAL hilir maupun menghasilkan bahan penutup NAF yang tepat adalah contoh dari pelaksanaan teknologi praktik kerja unggulan.

6.3 Sistem lapisan tanah penutup untuk batuan sisa dan tailing

Kebanyakan fasilitas penyimpanan limbah tambang yang terletak di permukaan, mengakibatkan bentuk lahan ditinggikan. Pemrosesan lain diperlukan untuk permukaan atas yang datar dan untuk sisi miring fasilitas penyimpanan tersebut.

6.3.1 Lapisan penutup di atas puncak datar

Lapisan penutup pada permukaan datar terdiri dari satu atau lebih lapisan bahan geokimia jinak dengan sifat fisik tertentu yang dimaksudkan untuk membatasi perkolasi curah hujan dan/atau masuknya oksigen ke dalam limbah reaktif yang tersimpan. Informasi lebih lanjut tentang sifat material yang dibutuhkan terdapat di bagian ini dan dalam rujukan yang dikutip.

Lapisan tanah penutup harus dijaga agar berisiko rendah yang berterima dan yang tidak membahayakan masyarakat dan lingkungan DAL dalam jangka waktu lama. Lapisan tersebut juga harus tahan terhadap terobosan oleh erosi, akar tanaman atau hewan yang menggali bawah tanah. Komponen yang terdaftar di bawah (dalam urutan dari permukaan) dapat membuat sistem penutup, tetapi perhatikan bahwa berbagai elemen desain (dan ketebalannya) yang pada akhirnya dimasukkan tergantung pada iklim lokasi tertentu, karakteristik geokimia dan fisik limbah, ketersediaan bahan dan persyaratan kinerja. Misalnya, pada sebagian besar tambang batubara di Australia, tersedia jenis batuan sedimen yang kurang mampu untuk membangun dan memelihara lapisan kapiler penahan. Pada operasi itu, penerapan kapiler penahan dalam sistem penutup tidak saja menjadi sangat mahal, tetapi juga cenderung membawa ke kegagalan melalui pengendapan migrasi diferensial dan butiran halus ke dalam lapisan kapiler penahan dalam jangka panjang.

Kemungkinan komponen dari sistem penutup tanah meliputi:

- humus (topsoil)—biasanya komponen utama, membutuhkan kapasitas penyimpanan air yang tinggi, sebuah siklus nutrient berkapasitas wajar dan kedalaman yang cukup (>0,5 m) untuk akar tanaman
- kapiler penahan di bagian atas—tahan lama, batuan segar jinak dengan butiran halus minimal, jika diperlukan untuk membatasi penetrasi akar ke dalam sumbat di bawahnya; lapisan ini membutuhkan nilai udara masuk (air-entry value/tekanan desaturasi) yang rendah dan ketebalan minimal dua kali ketinggian kapiler yang naik
- lapisan penyumbat—komponen utama terdiri dari limbah tanah liat yang dipadatkan, jika tersedia, atau komposit lapisan tanah liat ageosintetik; lapisan ini membutuhkan konduktivitas hidrolik rendah ($<10^{-8}$ m/s) untuk menahan infiltrasi curah hujan dan nilai udara masuk yang tinggi untuk mempertahankan saturasi guna mengurangi koefisien difusi oksigen
- kapiler penahan lebih rendah—jika limbah tambang bergaram dan/atau berpotensi membentuk asam, guna membatasi migrasi kontaminan ke atas ke dalam penutup.

Dalam iklim basah, di mana sulit untuk menghentikan perkolasi hujan, fungsi utama lapisan tanah penutup adalah untuk masuknya limitoksigen dan membatasi oksidasi limbah reaktif yang disimpan dan produksi DAL.

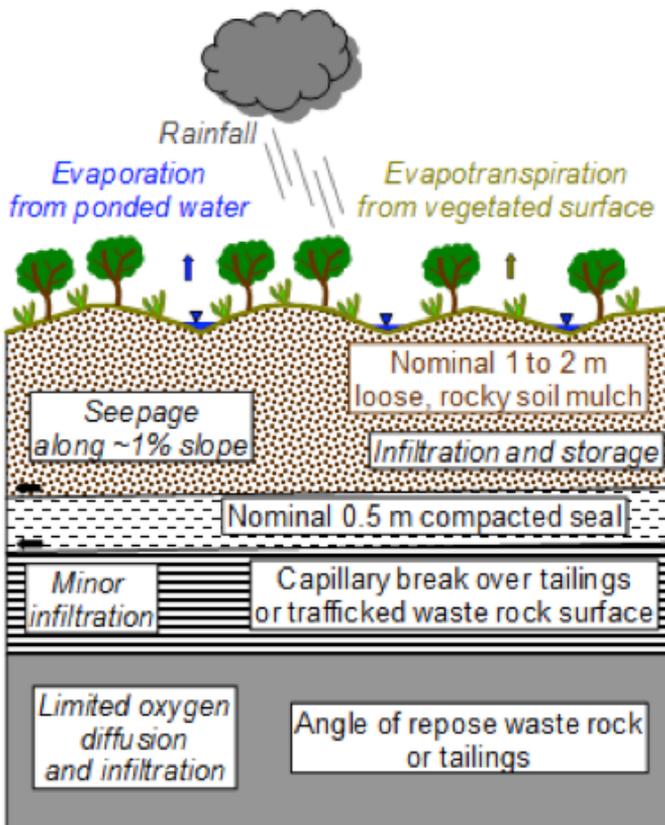
Lapisan penutup penepis atau penghalang biasanya terdiri dari sumbat tanah liat yang dipadatkan dengan ketebalan sekitar 0,5 m, ditidih dengan medium tumbuhan yang mungkin setipis 0,3 m. Ketebalan medium tumbuhan ini dapat mendukung rumput namun kurang memadai untuk kebanyakan semak dan pohon. Lapisan juga terlalu tipis untuk semuanya kecuali iklim yang paling basah, seperti saat iklim kering berkepanjangan akan menghasilkan pengeringan dari lapisan tanah liat di bawahnya, yang akan retak dan kehilangan daya kinerjanya. Misalnya, pemodelan kinerja lapisan penutup telah memperlihatkan bahwa ketebalan lapisan sedikitnya diperlukan 1 m dan mungkin lebih dari 2 m untuk mempertahankan kejenuhan lapisan tanah liat di daerah tropis beriklim hujan dan kemarau.

Lapisan penutup yang bermuatan lapisan penghalang tanah liat tidak dianjurkan untuk digunakan pada tailing lembut. Lapisan penyumbat dari lapisan tanah dipadatkan yang awalnya ditempatkan pada tailing yang tidak terkonsolidasi pasti akan gagal karena tegangan geser yang disebabkan oleh pengendapan diferensial terus menerus dari massa tailing.

Lapisan penutup penapis atau penghalang telah digunakan dengan cukup berhasil pada kedua permukaan datar dan lereng-lereng curam pada sejumlah lokasi tambang beriklim basah, termasuk tambang bijih besi Savage River di barat laut Tasmania (lihat studi kasus 5 dalam buku pegangan ini) dan dalam iklim basah luar Australia. Sebuah lapisan penutup yang bervegetasi dapat menangani curah hujan tinggi sementara membatasi erosi yang berlebihan. Dalam iklim yang lebih kering atau iklim musiman basah-kering, di mana sulit untuk mempertahankan lapisan tanah penutup dalam keadaan jenuh, fungsi utama dari lapisan tanah penutup adalah untuk membatasi perkolasi curah hujan ke dalam limbah (Gambar 27). Dalam rangka membangun sistem penutup atas tailing, mungkin perlu untuk terlebih dulu mengembangkan pelatar (platform) konstruksi di atas tailing. Ini juga dapat berfungsi sebagai kapiler penahan, jika praktis dan diperlukan.

Menyadari kekurangan potensi penutup penapis atau penghalang di lokasi tambang iklim kering, sistem penutup simpan/lepas menggabungkan kapiler penahan sistem lapisan penutup dikembangkan selama pertengahan tahun 1990 untuk menutup WRD di tambang emas Kidston di Queensland utara (Williams et al. 2006). Sistem ini dirancang untuk menyimpan curah hujan pada musim hujan tanpa penapisan tersebut, karena limpasan yang berlebihan akan mengakibatkan banyak erosi pada lapisan penutup, dan untuk melepaskan air yang disimpan melalui musim panas lewat evapotranspirasi, tanpa jaring pembasahan atau pengeringan lapisan penutup dari tahun ke tahun. Lapisan penutup simpan/lepas dapat membatasi perkolasi curah hujan rata-rata tahunan (Williams et al. 2006) secara signifikan, sehingga mengurangi pembasahan berkelanjutan dari limbah tambang dan produksi rembesan di bawahnya. Acuan lain untuk efektivitas lapisan penutup simpan/lepas terdapat dalam O'Kane dan Ayres (2012).

Gambar 27: Skema lapisan penutup simpan/lepas



Sumber: Williams et al. (1997).

Faktor penting untuk keberhasilan lapisan penutup simpan/lepas adalah:

- permukaan atas yang ditimbun sebagai bukit kecil dari truk pembuangan untuk mencegah limpasan
- ketebalan yang cukup longgar, tanah berbatu untuk menyimpan air dari hujan deras berkepanjangan
- lapisan penyumbat konduktivitas hidrolis yang cukup rendah untuk menahan sebagian besar infiltrasi curah hujan disimpan dalam lapisan tanah berbatu lepas
- penutup vegetasi berkelanjutan agar curah hujan yang tersimpan yang tidak menguap.

Sistem lapisan penutup Kidston merupakan suatu keberhasilan dari sudut pandang pembatasan infiltrasi bersih (Williams et al. 2006). Namun, lapisan penutup yang ditempatkan di bagian atas WRD menuju penutupan dan kemudian bertahun-tahun terpapar oksigen dan infiltrasi curah hujan, yang terus menarik ke bawah dan menghasilkan rembesan berkualitas buruk, yang muncul pada titik-titik yang rendah sekitar ujung kaki fasilitas. Kejadian ini menggambarkan sulitnya mengontrol surutnya produksi yang telah terkontaminasi rembesan AMD dengan instalasi lapisan penutup setelah oksidasi yang signifikan dan infiltrasi curah hujan ke dalam WRD yang tidak tertutup lapisan.

Informasi lebih lanjut tentang desain sistem lapisan penutup serta karakterisasi dan sifat bahan yang digunakan untuk konstruksi mereka dalam Pedoman GARD dan dalam laporan komprehensif empat jilid yang diterbitkan oleh program MEND Kanada (MEND 2004).

6.3.2 Pemrosesan lereng luar

Lereng luar penyimpanan limbah tambang perlu curam, dan stabilitasnya sering bermasalah dalam jangka panjang karena praktik-praktik seperti:

- membentuk kembali (perataan) lereng dengan dozer—ini mengurangi 'kekasaran' dari permukaan dengan menghancurkan dan mengubur bahan kasar, mengakibatkan peningkatan limpasan dan mengurangi resistensi erosi
- meningkatkan panjang lereng dengan perataan lereng dengan ketinggian tertentu—ini meningkatkan daerah tangkapan air dan potensi erosi untuk pemrosesan permukaan tertentu
- konsentrasi limpasan curah hujan pada kontur dan lereng bawah saluran air—ini meningkatkan potensi untuk membuat terowongan dan erosi pada parit
- membangun struktur drainase yang kurang memadai karena pengendapan di bawahnya, terutama pada bangku-bangku kontur dan pada sambungan-sambungan
- menempatkan media butiran halus dan/atau tumbuhan sebar di lereng curam, yang sangat rentan terhadap erosi.

WRD dan TSF lereng tanggul terluar umumnya memiliki stabilitas geoteknik dan erosi yang memadai. Namun, rehabilitasi konvensional lereng tersebut dapat mengakibatkan lereng akhir dengan stabilitas geoteknik yang memadai tetapi stabilitas erosi yang kurang memadai. Pendekatan alternatif untuk menciptakan lereng akhir yang stabil, menggunakan analog alam sekitarnya, menawarkan potensi untuk menghasilkan stabilitas geoteknik lereng dan erosi tinggi yang berkelanjutan dan perbaikan estetika. Lereng alami umumnya cekung dan ditamengi dengan batu, kuncup yang disemen batuan dan vegetasi.

Metode-metode yang digunakan untuk menstabilkan penyimpanan limbah tambang lereng luar sangat bervariasi, tergantung pada bahan iklim dan permukaan. Lapisan penutup vegetasi berat mungkin sangat sukses dalam mengurangi erosi di beberapa daerah, sedangkan daerah dengan iklim musiman, kering atau semi-kering mungkin tidak mendukung vegetasi yang cukup untuk mengendalikan erosi. Daerah seperti ini membutuhkan strategi perlindungan erosi lain, termasuk pembatasan lereng daerah tangkapan air atau penempatan lapisan penutup permukaan batuan sisa jinak butiran kasar. Batuan dapat dicampur dengan bahan dasar atau butiran halus sekedarnya yang mungkin dapat ditambahkan ke dalam campuran untuk meningkatkan retensi air dan potensi untuk revegetasi.

Sementara kontur dan saluran air lereng bawah memiliki sejarah kinerja yang buruk, parit yang secara substansial diuruk batuan dapat dibangun untuk menangani limpasan curah hujan yang berlebihan. Sudut kritis lereng akhir, yang membatasi biaya pembangunan lereng, mungkin dapat dibuat di bagian atas lereng, asalkan dibuat di beberapa profil lereng (yaitu, dilengkapi dengan profil lereng cekung). Profil lereng cekung, yang menyerupai lereng alami, membatasi hilangnya sedimen dari lereng. Uji coba yang dipantau umumnya diperlukan untuk mengembangkan penanganan lereng yang paling tepat untuk lokasi tambang tertentu.

6.3.3 Desain lapisan penutup dan kinerja

Fitur terkait kinerja utama yang perlu dipertimbangkan selama desain sistem lapisan penutup untuk meminimalkan atau mencegah DAL adalah:

1. minimalisasi masuknya oksigen
2. minimalisasi infiltrasi bersih (yaitu, proporsi curah hujan insiden yang menembus ke bahan reaktif)
3. stabilitas jangka panjang (misalnya, lapisan tanah liat yang dipadatkan, kapiler penahan, lapisan drainase) dari komponen yang digunakan untuk membangun sistem lapisan penutup
4. perlawanan erosi permukaan jangka panjang
5. keberlanjutan dari lapisan vegetasi penutup bila diperlukan untuk alasan estetika dan/atau fungsional (misalnya, lapisan penutup simpan/lepas).

Pemodelan numerik dapat diterapkan untuk desain lapisan penutup untuk memastikan agar meminimalkan pembentukan dan keluarnya produk oksidasi sulfida dalam jangka panjang. Tujuannya adalah untuk membatasi masuknya oksigen dan/atau air, yang merupakan dua reaktan yang diperlukan untuk mendorong pembentukan DAL. Membatasi masuknya air juga meminimalkan pengangkutan produk oksidasi.

Sejumlah program komputer yang sesuai tersedia untuk tujuan ini. Program-program umumnya berdasarkan metode elemen hingga dan memasukkan tanah mekanik parameter tak jenuh. Kebanyakan analisis sekarang dua dimensi. Analisis-analisis didorong pertama-tama oleh data iklim historis untuk lokasi. Namun, efek potensial dari perubahan iklim terhadap parameter masukan juga perlu ditangani, mengingat kinerja perlu dipertahankan dalam jangka panjang.

Saat merancang lapisan tanah penutup dengan menggunakan model, perlu untuk memahami karakteristik geokimia dan geofisika bahan yang akan dibahas dan juga bahan-bahan yang tersedia untuk membangun lapisan penutup. Setiap jenis tanah dan batuan berperilaku berbeda, dan pengujian laboratorium diperlukan untuk memberikan parameter input untuk model. Untuk daftar yang lebih rinci dari model yang tersedia dan indikasi penerapannya, rujuklah Pedoman GARD.⁴⁵

Tergantung pada ketersediaan bahan tanah dan variabilitas mereka, mungkin banyak pengujian diperlukan untuk secara memadai mencirikan mereka. Uji coba terpantau umumnya diperlukan untuk memverifikasi desain lapisan penutup dan untuk memilih spesies vegetasi yang paling tepat untuk lokasi tambang tertentu. Instalasi peralatan pemantauan dan interpretasi data yang dikumpulkan akan perlu 'memperlihatkan' kinerja lapisan penutup tersebut dan juga untuk mengkalibrasi ulang model berdasarkan data pemantauan kinerja. Karena lapisan penutup merupakan sistem dinamis yang krusial bergantung pada tutupan vegetasi dan kemampuannya untuk menghadapi setiap variasi iklim, pemantauan jangka panjang penting untuk memperlihatkan kinerja yang berkelanjutan.

⁴⁵ <http://www.gardguide.com>.

Lapisan penutup penepis curah hujan atau lapisan penutup penghalang cenderung berkinerja buruk pada iklim musiman dan gagal pada iklim semi-kering dan gersang, di mana tutupan vegetasi buruk dan lapisan penyumbatan rawan retak, penetrasi akar dan erosi. Sementara tanah liat yang dipadatkan mungkin awalnya memberikan konduktivitas hidrolik kurang dari 10-8 m/s atau 300 mm/tahun, keretakan yang terjadi selama periode kering meningkat sekitar seratus kali lipat dan juga tidak lagi menyumbat dengan baik.⁴⁶

Hasil pemantauan kinerja lapisan penutup dalam jangka menengah (satu hingga dua dekade) dibahas dalam Taylor et al. (2003), O'Kane Konsultan Inc (2003) dan Williams et al. (2006). Wilson et al. (2003) berusaha untuk menempatkan dalam perspektif jangka pendek dan jangka panjang integritas berbagai sistem lapisan penutup, mulai dari vegetatif sederhana mencakup komposit rumit yang digunakan untuk urukan, dan memakan biaya dari \$10.000 hingga \$400.000/ha. Di antara lapisan penutup berkisaran biaya rendah hingga sedang yang biasanya digunakan di lokasi tambang, lapisan penutup jenis penghalang dari tanah liat yang dipadatkan meliputi biaya sekitar \$35.000/ha diketahui (umumnya) berkinerja buruk dalam jangka panjang, sementara lapisan penutup simpan/lepas mencakup biaya sekitar \$50.000/ha (misalnya, di tambang-tambang emas Kidston) telah berkinerja jauh lebih baik (Wilson et al. 2003). Dalam konteks ini, perlu dicatat bahwa biaya yang dikutip per hektar berasal dari sebelum tahun 2003, sehingga biaya untuk membangun lapisan penutup yang sama hari ini akan jauh lebih tinggi.

Kemungkinan penurunan yang signifikan dalam kinerja lapisan penutup melalui waktu harus menjadi faktor pertimbangan dalam desain keseluruhan dari fasilitas pembendungan limbah, dalam konteks pengembangan tujuan kinerja pasca-penutupan berkelanjutan dan kriteria.

6.4 Pencampuran dan pembuangan limbah gabungan

Pencampuran bahan belum diadopsi secara rutin di kalangan industri pertambangan Australia, terutama karena masalah logistik dan biaya yang berkaitan dengan penjadwalan, memberikan dan pencampuran volume yang signifikan dari limbah tambang.

Pencampuran dan pembuangan gabungan untuk urukan memang terjadi di tambang bawah tanah, dan pembuangan limbah bersama yang dipompa dari pelindian batubara cukup umum dalam kalangan industri batubara. Bahan PAF terkadang dicampur dengan semen atau campuran semen dan tailing serta ditempatkan di rongga bawah tanah sebagai urukan. Selain perannya sebagai pemberi daya pengikat, matriks semen memiliki kapasitas penetral yang signifikan.

Pencampuran bahan batuan sisa PAF dengan batuan karbonat atau pembuangan gabungan dengan bahan batuan sisa mengandung karbonat telah memiliki sejarah campuran kesuksesan karena pencampuran yang kurang memadai, penambahan yang kurang cukup berkapasitas menetralkan dan penggunaan butiran dengan yang terlalu kasar untuk neutralan tersebut. Penamangan butir karbonat dengan endapan produk penetral DAL secara signifikan menghambat terurainya mineral karbonat, sehingga diperlukan kapasitas penetralan yang lebih besar untuk strategi tersebut agar berhasil dalam jangka panjang. Penggunaan bahan penetral di mana oksidasi limbah telah terjadi secara substansial juga harus memperhitungkan penyimpanan kemasaman dalam mineral sekunder sebagai jarosit.

Pemantauan DAL melalui penggunaan limbah tambang berkarbonat tinggi (bercampur/lapisan penutup) telah dibuktikan di Ok Tedi (Papua New Guinea), Grasberg (Indonesia) dan Savage River (Australia). Pada Ok Tedi maupun Grasberg, faktor keselamatan substansial (ANC/MPA >2) dalam fraksi reaktif dari batuan sisa dan kapur campuran diperlukan untuk memberikan jaminan kinerja dalam jangka panjang (Miller 2014).

Secara umum, penambahan hancuran batuan kapur selama pembangunan WRD dari bawah ke atas menggunakan lapisan tipis vertikal (seperti dijelaskan di atas) atau dengan menggunakan penghancur/penumpuk atau metode konveyor agar penempatan memiliki kesempatan lebih baik untuk mencapai penggunaan yang efektif dari penetral dibandingkan timbunan akhir dari bahan karbonat muka timbunan aktif di bawah ROM.

⁴⁶ Sebuah ulasan komprehensif masalah ini, bersama-sama dengan studi kasus yang relevan, terdapat dalam MEND (2004).

6.5 Tambang-tambang di bawah tanah

Banyak tambang bawah tanah bersejarah di daerah pegunungan atau perbukitan dengan terletak dan dirancang dengan hati-hati untuk membiarkan drainase terowongan buntu (adit) untuk dengan pasif mengeringkan sebanyak mungkin batuan samping yang mengelilingi cadangan logam. Pendekatan ini mudah mengatasi masalah pengeringan tapi efektif memaksimalkan oleh potensi pembentukan dan pelepasan DAL.

Meskipun telah ada pelajaran semacam itu dari masa lalu, sering kurang dipikirkan untuk implikasi lingkungan dari lokasi dan merancang akses portal di tambang bawah tanah untuk pasca-penutupan saat ini, dengan konsekuensi banyak pelepasan air DAL terpapar dampak dari portal tambang mereka. Drainase berkualitas buruk tersebut akibat dari dinding batuan yang mengelilingi area ditambang, serta dari timbunan limbah tambang sulfida. Selain itu, tambang modern yang menggunakan metode gua blok juga menghasilkan dalam volume yang sangat besar bijih sulfida yang sangat retak yang dapat tetap terpapar di bawah tanah selama bertahun-tahun, dalam persinggungan dengan udara dan air, dan dengan demikian menghasilkan drainase berkualitas rendah selama operasi.

Tantangan DAL yang berkaitan dengan tambang bawah tanah terbaik ditangani selama tahap awal perencanaan tambang, dengan fokus pada strategi pencegahan dan minimalisasi. Strategi praktik kerja unggulan sebagai berikut:

- Hindari kebutuhan untuk menggunakan (risiko tinggi) tekanan bulkhead setelah penutupan dengan merencanakan untuk memposisikan portal tambang pada titik topografi yang tinggi, memastikan agar semua batuan dinding tak jenuh dan setiap pengurukan sulfida akan pasif dibanjiri oleh air tanah yang kembali dengan sendirinya.
- Jika memungkinkan usahakan agar titik-titik luapan tambang pada pasca-penutupan tidak bertambah (tergantung pada hidrogeologi setempat).
- Secara strategis luruskan penurunan dan pengembangan jalan kendaraan untuk meminimalkan kemungkinan menghalangi bahan PAF selama penambangan. Misalnya, jenis-jenis mineralisasi seperti endapan massif sulfida vulkanik di tempat dapat memiliki footwall mineral dan hanging wall yang relatif tandus. Menargetkan yang terakhir untuk jalan pembangunan dapat mengurangi produksi batuan sisa PAF dan karena itu risiko DAL, asalkan hanging wall kompeten secara geoteknik.
- Pisahkan limbah sehingga batuan PAF dapat dipertahankan di bawah tanah untuk pengurukan tambang dan kemungkinan terjadinya genangan air tanah di bawahnya.
- Hindari menyimpan batuan sisa PAF dan tailing di atas tingkat tumpahan akhir pasif minimum air tambang jika pertumpahan tambang pasca-penutupan sulit untuk dicegah. Semua limbah pengurukan sulfida mungkin perlu ditempatkan di bawah lapisan air tanah penutup permanen dengan dengan ketebalan minimum 2m (Oxley et al. 2008).

Pencegahan dan minimalisasi DAL tetap menjadi masalah yang signifikan bagi tambang bawah tanah, terutama di lokasi brownfield, dan teknologi seperti sistem-sistem inert atmosphere (proses mengkondisikan gas di dalam tangki hingga kondisi lembam) (Taylor & Waring 2001) saat ini sedang diuji untuk mengatasi tantangan tersebut (Pasal 11).

6.6 Danau-danau pit

6.6.1 Latar belakang

Danau pit terus menjadi perhatian utama dalam pengembangan strategi perencanaan penutupan, dan semakin menjadi fitur di lokasi tambang yang selesai di sekitar Australia (Kumar et al. 2013). Namun, danau tersebut berpotensi dapat mewakili kesehatan masyarakat yang signifikan, kewajiban lingkungan dan keuangan bagi banyak yurisdiksi, terutama karena efek penuh kemasaman dan zat terlarut konsentrasi mungkin tidak menjadi jelas selama beberapa dekade setelah penutupan tambang. Danau pit juga dapat menjadi habitat satwa liar penting di mana beberapa zat terlarut berpotensi dapat masuk ke jaringan makanan lokal.

Bentuk alam penutupan ini dapat secara substansial mengubah pilihan penggunaan lahan di masa depan dan risiko penutupan tambang pada skala lanskap (McCullough dan Van Etten 2011) di daerah di mana diprediksi akan banyak danau pit besar (seperti wilayah Pilbara dan Collie Coal Basin di Western Australia dan Bowen Basin di Queensland). Jadi efek kumulatif, misalnya, pada ketinggian muka air tanah dan kualitas danau pit terdekat lain mungkin juga perlu ditangani sebagai bagian dari perencanaan penutupan.

Mengantisipasi penggunaan paling akhir lubang tambang pada awal proyek pertambangan belum tentu tugas yang jelas, terutama karena batas-batas sumber daya secara ekonomis dapat mengubah seluruh kehidupan proyek. Pada akhir tahap operasi tambang terbuka, adanya kemungkinan lubang terisi air mungkin perlu dipertimbangkan dalam konteks mempertahankan akses ke bawah tanah di masa depan. Pengeringan pit yang sebelumnya telah dibiarkan terisi dapat menjadi pekerjaan yang sangat mahal jika air membutuhkan perawatan kimia sebelum digunakan kembali atau dilepaskan. Untuk alasan ini, perencanaan penggunaan akhir lubang tambang berlatar belakang yang konfigurasi awalnya tak menentu dan kehidupan tambang mungkin salah satu aspek yang paling menantang dari penutupan dan rehabilitasi tambang.

6.6.2 Memprediksi kualitas air di danau pit

Kemajuan selama dekade terakhir dalam prediksi kualitas air telah dimungkinkan oleh beberapa contoh internasional tentang pelaksanaan lapangan berskala penuh dan dengan kapasitas berkembang ditambah model geokimia hidrodinamik dan solusi yang dipantau dengan baik. Namun, danau pit sebagai pilihan penutupan masih dapat memberikan kemungkinan besar adanya risiko warisan dan kewajiban DAL (McCullough & Lund 2006), mengingat jangka waktu yang lama bagi tubuh-tubuh air yang besar untuk berinteraksi dengan lingkungan sekitarnya. Dalam konteks ini, perlu dibedakan antara danau pit yang dasarnya telah dikembangkan tanpa perencanaan (lokasi warisan) dan yang telah dihasilkan sebagai komponen yang dikembangkan dengan baik dari rencana penutupan strategis, dengan sasaran mutu air yang ditetapkan. Sementara fokus dari bagian ini pada yang terakhir, pendekatan yang dijelaskan juga berlaku untuk danau pit warisan.

Pemahaman evolusi kualitas air danau pit dalam jangka panjang sangat penting untuk menilai dan mengelola risiko penutupan yang disajikan oleh pilihan ini (Castendyk & Eary 2009). Rumitnya dan luasnya interaksi antara faktor hidrologi dan geokimia berarti prediksi kualitas air pit merupakan latihan yang sangat spesifik. Hal ini harus dilakukan dengan mengikuti pendekatan berbasis risiko dan hasil dengan menggunakan metodologi ilmiah yang kuat.

Pada tingkat yang paling sederhana, prognosis jangka panjang kualitas air danau pit mungkin dapat diperoleh dengan membandingkan danau yang diusulkan dengan danau pit terdekat atau danau pit tempat lain yang dalam sejarahnya telah bekerja dengan konteks geologi yang sama. Kemampuan yang diprediksikan dapat ditingkatkan dengan menggabungkan temuan spesifik-lokasi dari penilaian geokimia dasar, seperti uji statis dan kinetik (Bagian 4). Jika penilaian awal memperlihatkan kemungkinan tinggi kualitas air buruk, terlepas dari kemungkinan langkah-langkah mitigasi (seperti, pengelolaan daerah tangkapan air atau banjir yang cepat), kemungkinan besar tidak akan menjamin prediksi lebih lanjut (Hannam & Green 2014). Sebaliknya, jika penilaian awal memperlihatkan bahwa kualitas air yang lebih tinggi mungkin dapat dicapai, membuka kemungkinan untuk menggunakan tingkat yang lebih tinggi, maka prediksi yang lebih rinci, menggunakan berbagai alat pemodelan yang tersedia, dapat dibenarkan sebagai bagian dari perencanaan penutupan.

Pemilihan dan penerapan model prediksi harus didukung oleh model konseptual yang menjelaskan semua asumsi utama dan proses yang perlu ditangani oleh model. Model konseptual idealnya harus dikembangkan dalam lokakarya yang melibatkan staf operasional dan spesialis teknis dari disiplin ilmu yang relevan. Amat penting agar model harus terus berkembang dalam menanggapi perubahan dalam rencana tambang dan temuan dari pemodelan, pemantauan dan validasi berikutnya latihan.

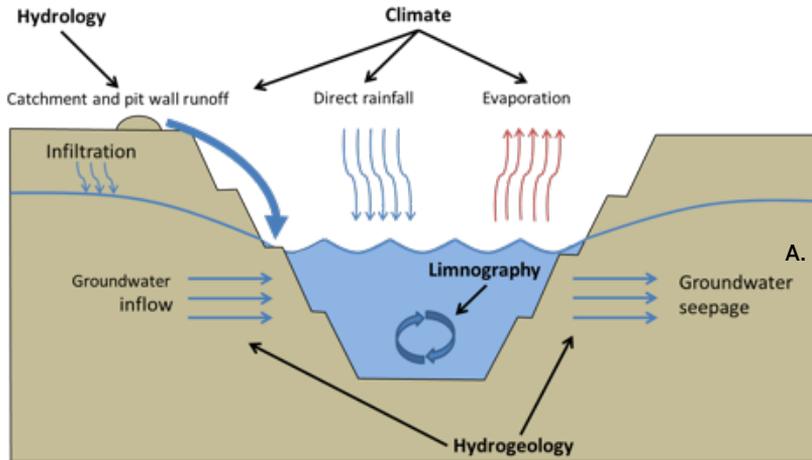
Kesimpulan model utama harus dinilai ulang seiring data baru yang tersedia. Misalnya, hal ini harus dilakukan dengan berkembangnya tambang dari ketentuan eksplorasi dan sumber daya melalui operasi. Sama halnya dengan keterbatasan data yang awalnya diidentifikasi harus secara iteratif mendorong pengumpulan data dengan program pemantauan yang dirancang khusus. Ketidakpastian dalam input data tidak selalu membatasi penggunaan model yang kuat, tetapi harus selalu diakui sebagai batasan untuk kepastian (presisi) dari output model.

Meskipun prediksi kuat mungkin menjadi tujuan utama dari pemodelan prediksi, model dapat (dan harus) dapat juga digunakan untuk mengeksplorasi sejauh mana kontribusinya untuk kualitas air dengan berbagai proses. Proses ini membantu untuk pemahaman yang lebih baik dari ketidakpastian risiko dalam menginformasikan keputusan manajemen. Analisis sensitivitas seperti ini juga dapat menyoroti keterbatasan dan kelemahan model dan mengidentifikasi peluang untuk meningkatkan keakuratan.

Memprediksi kualitas air danau pit memerlukan juga pemahaman neraca air danau⁴⁷ serta sumber DAL dan zat terlarut lainnya yang akan mempengaruhi kualitas air (Gambar 28). Namun, tidak ada pendekatan yang diterima secara universal untuk melakukan hal ini. Meskipun ada beberapa kesamaan antara danau alam dan danau pit, ada perbedaan mendasar yang harus ditangani. Secara khusus, danau pit lebih mirip dengan waduk yang dibangun yaitu bahwa danau-danau pit yang relatif biasanya lebih dalam untuk luas permukaannya, dengan implikasi untuk pengaruh kolom stratifikasi air pada kimia air (Geller et al. 2013).

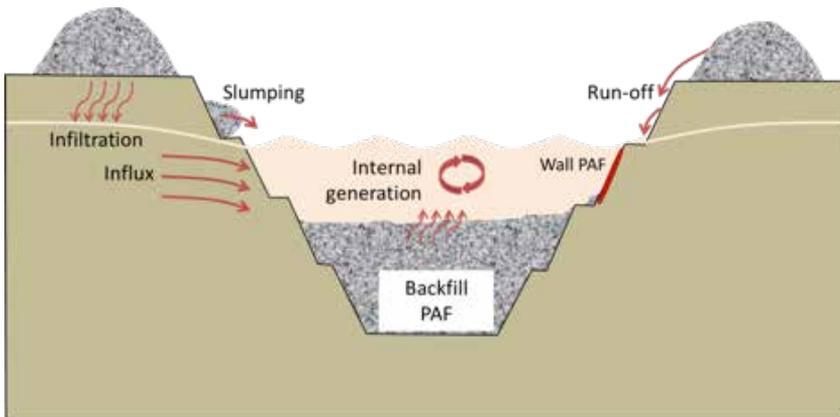
Risiko periode meromiksis (stratifikasi yang terus berlanjut), diselingi oleh pencampuran periodik dari kolom air, khususnya, dapat memiliki implikasi besar untuk pemeliharaan kualitas air. Danau pit juga berbeda dari danau alam di mana daerah tangkapan airnya yang sering bermuatan bahan reaktif (sulfida) yang telah terpapar atau terganggu saat penambangan. Danau yang terbentuk di pit-pit dapat dipengaruhi oleh sifat hidrolik dan produk pelapukan batuan sisa dan tailing yang membentuk akuifer yang terlepas ke dalam sistem. Properti-properti tersebut dapat berubah dari waktu ke waktu, dan hidrologi dan kualitas air dari rongga akhir dapat berkembang selama bertahun-tahun sebelum mendekati kondisi statis/mapan.

Gambar 28: Model konseptual untuk proses untuk menentukan neraca air jangka panjang (A) dan kualitas air (B) yang harus secara eksplisit dipertimbangkan dalam prediksi kualitas air danau pit.



47 Lihat buku pegangan praktik kerja unggulan Penatagunaan air untuk pedoman tentang faktor-faktor yang mempengaruhi neraca air (IS 2016g).

B.



Catatan: 'Limnografi' mengacu kepada proses fisik yang terjadi di dalam badan air tawar air.

Apakah danau pit akan menjadi cekungan terminal (yaitu, itu tidak akan pernah mengalir melalui permukaan atau pun air tanah), menjadi bagian rezim yang dilalui oleh air tanah, atau pada akhirnya pelepasan oleh tumpahan, akan ditentukan oleh neraca air. Neraca air danau pit secara luas dapat didefinisikan dengan menggunakan alat-alat mulai dari spreadsheet sederhana hingga model perangkat lunak probabilitas yang lebih rumit. Yang paling mendasar, neraca air akan perlu memperlihatkan apakah danau pit pada akhirnya akan menjadi rezim yang dilalui air atau cekungan terminal untuk air dan zat terlarut (McCullough et al. 2013). Risiko kurasan permukaan dan air tanah dari pit kemudian dapat dinilai.

Proses yang memantau volume air dalam lubang adalah curah hujan langsung; penguapan; aliran masuk permukaan air dan air tanah; dan aliran ke luar air permukaan dan air tanah. Tidak seperti kebanyakan danau alam dan waduk, lubang tambang sering kekurangan aliran keluar air permukaan. Dalam beberapa kasus, lubang pengisian mungkin kehilangan air hanya melalui penguapan. Variabilitas curah hujan, terutama di daerah yang terpapar depresi hujan tropis, mempersulit pengelolaan air dan prediksi ketinggian muka air. Pada lokasi seperti itu, perubahan besar dalam penyimpanan air pit dapat diperkirakan akan terjadi, dan freeboard yang tersedia untuk mencegah luapan tak terkendali dan paparan dari strata reaktif menjadi kritis.⁴⁸

Masukan zat terlarut ke dalam danau berkembang dapat didefinisikan menggunakan output dari uji statis atau, lebih disukai, uji kerja kinetik pada dinding batu, limbah atau tailing yang ditempatkan di dasar tangkapan air pit, limbah di tempat pembuangan yang terletak di tempat penampungan pit dan dari data kualitas air dari air permukaan dan air tanah yang akan di masukkan sebagai input ke pit. Data ini dapat digunakan dalam mencampur model atau model geokimia yang lebih rumit eksklusif untuk danau. Idealnya, semua input yang digunakan untuk pemodelan prediktif harus diperoleh dengan menggunakan sampel dan durasi pengujian langsung yang relevan dengan konteks dan skala waktu final danau pit.

Sejumlah alat pemodelan yang tersedia, seperti yang dijelaskan oleh Vandenberg et al. (2011). Pemilihan model harus berfokus pada:

- pendekatan dan paket apa yang terbaik yang memenuhi persyaratan pertanyaan pemodelan
- data apa yang tersedia
- tingkat keahlian teknis dan pengalaman yang ada baik in-house atau dari konsultan eksternal untuk menjalankan model dan menafsirkan output-nya.

⁴⁸ Lihat studi kasus Mount Morgan dalam Bagian 7.

Harapan pemangku kepentingan dan pengalaman sebelumnya dan kepercayaan dari regulator dengan paket pemodelan tertentu juga dapat menjadi faktor penting dalam memilih model. Misalnya, model sumber terbuka atau model yang diterima secara luas dan digunakan harus lebih disukai, karena mereka lebih dapat diuji secara independen dan diulas oleh teman sejawat.

Secara umum, kualitas dan tingkat input data dan asumsi yang dibuat dalam mengembangkan model akan merupakan keterbatasan terbesar pada keandalan prediksi, mengingat kecanggihan perangkat lunak pemodelan danau modern. Produksi neraca air danau yang kuat sering dibatasi oleh:

- data hidrologis yang ada yang dibatasi oleh yang ditentukan untuk operasi pengeringan pit
- data curah hujan seri-waktu yang kurang memadai dan data iklim lain yang relevan
- data air permukaan dasar terbatas dan kualitas air tanah
- pemahaman regional terbatas yang lebih luas dari fitur aliran pilihan, seperti patahan dan distribusi sungai purba (palaeochannel).

Efek potensial dari variabilitas iklim pada curah hujan dan penguapan juga harus dipertimbangkan, mengingat melibatkan jangka waktu yang lama. Demikian pula, penilaian geokimia harus memberikan informasi tentang reaktivitas bahan (misalnya, dinding batu, batuan atau tailing ditimbun) yang diharapkan akan terpapar dan/atau tenggelam di danau pit. Ini mungkin melibatkan kolom atau pengujian batch sampel dari bahan bawah oksik jenuh dan/atau kondisi anoksik jenuh (untuk mensimulasikan upaya stratifikasi) meliputi beberapa bulan atau bahkan bertahun-tahun.

Hal ini sangat menyulitkan untuk memvalidasi prediksi evolusi kualitas air untuk pit yang mungkin membutuhkan waktu puluhan tahun atau lebih lama untuk pengisiannya setelah penghentian pengeringan (Castendyk & Eary 2009). Untuk alasan ini, prediksi penilaian kualitas air danau pit harus sangat berhati-hati, dan penggunaan model probabilistik menggabungkan pertimbangan variabilitas stokastik harus disukai lebih dari pendekatan deterministik untuk analisis akhir. Dalam konteks ini, penelitian telah memperlihatkan bahwa prediksi lintasan kualitas air pit bagi danau tersebut yang seiring waktu ekologi atau penggunaan lainnya bermanfaat seperti yang terlalu sering dibayangkan ternyata terlalu optimis (Kuipers et al. 2006).

Faktor-faktor berikut telah ditemukan paling penting untuk membangun dan memelihara nilai-nilai pada danau pit yang berisiko dari pengaruh DAL untuk mencapai jangkauan luas tujuan penutupan (McCullough 2011; Geller et al 2013.):

- 1. pengisian cepat untuk meminimalkan waktu paparan dari sulfida reaktif dalam dinding batu atau limbah sulfida yang telah ditempatkan di pit**
- 2. memotong kembali dinding pit dan/atau bahan penutup PAF yang terpapar terhadap batuan dinding NAF jika batuan dinding yang bermuatan sulfida masih akan terpapar pada tingkat pengisian maksimal**
- 3. meminimasi jumlah DAL dalam daerah tangkapan air permukaan dan air tanah yang masuk ke danau**
- 4. mempertahankan stratifikasi kolom air**
- 5. mendirikan rezim aliran-lewat permukaan untuk menyiram zat terlarut yang terakumulasi dari danau**
- 6. mengurangi erosi daerah tangkapan air dan potensi merosotnya dinding pit**
- 7. memfasilitasi pengembangan produktivitas biologis dalam zona eufotik (penetrasi cahaya).**

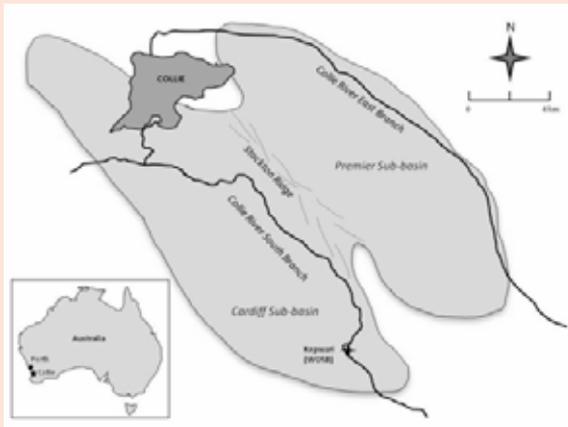
Studi kasus 9 menggambarkan manfaat yang dapat diperoleh dengan menerapkan rezim aliran melalui permukaan untuk sebuah danau pit di distrik pertambangan batubara Collie, Western Australia.

Studi kasus 9: Danau pit yang dibanjiri dengan rezim aliran air-lewat, Lake Kepwari, ladang batubara Collie, Western Australia

Konteks

Collie Coal Basin adalah pusat industri pertambangan batubara di Western Australia dan terletak sekitar 160 km sebelah tenggara selatan Perth. Lebih dari 100 tahun pertambangan batubara di Collie telah mengakibatkan pembentukan sedikitnya 13 danau pit dengan kualitas air dan tingkat rehabilitasi yang berbeda. Semua masam karena produksi sedang DAL dari oksidasi satuan batuan rendah sulfida regional.

Pertambangan mulai di pit Lake Kepwari (WO5B), dengan pengalihan Collie River di Cabang Selatan (Sungai Collie South Branch (CRSB)) sekitar margin rongga sebelah barat (Gambar 1). Penutupan ini bertujuan agar danau dapat untuk penyediaan sumber daya rekreasi ski air, menyelam dan kegiatan rekreasi air lainnya. Saat pertambangan berhenti pada tahun 1997, penimbunan overburden yang paling reaktif dan lapisan batubara terpapar ditutupi dengan batuan sisa untuk menutup sumber PAF. Tepi-tepi danau yang diuruk dan bertingkat di beberapa bagian untuk membentuk pantai dan pulau, dan kemudian secara ekstensif dihijaukan kembali dengan flora endemik penyemaian langsung. Saluran pengalihan kemudian dipertahankan untuk secara permanen mengalihkan CRSB sekitar rongga pit.



Gambar 1: Lokasi dan skema rencana Danau Kepwari di Western Australia

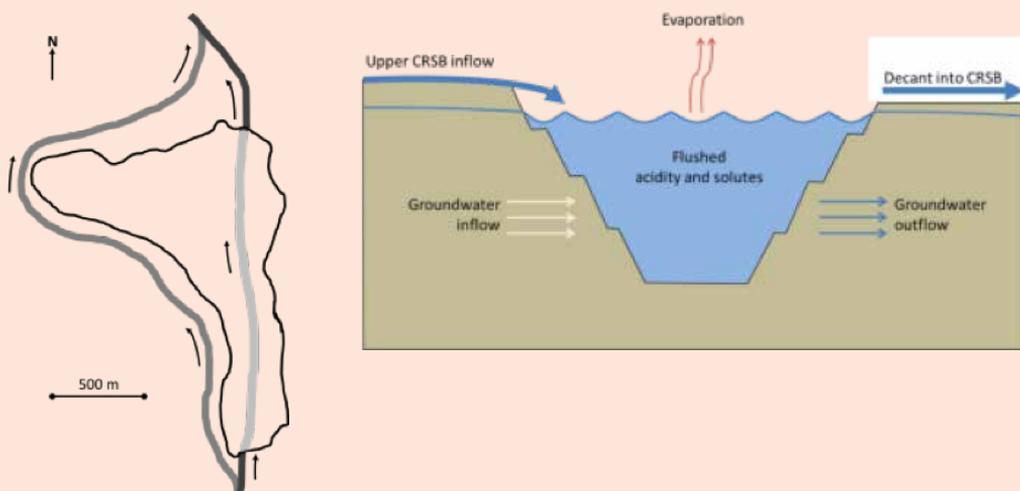
Evolusi kualitas air danau pit

Kepwari Lake bervolume sekitar $32 \times 10^6 \text{ m}^3$, dengan kedalaman maksimal sekitar 65 m dan luas permukaan $1,0 \text{ km}^2$ (McCullough et al. 2010). Untuk lebih mengurangi paparan dinding dan kadar masam yang dihasilkan, danau tersebut cepat diisi dengan pengalihan musiman CRSB selama musim dingin antara tahun 2002 hingga 2008. Kualitas air CRSB biasanya payau dan sangat bernoda tanin, dengan potensi eutrofikasi sedang. Meskipun masukan air CRSB awalnya mengangkat pH di atas pH 5, pH turun di bawah 4 setelah arus sungai berhenti. pH tersebut rendah dan konsentrasi tinggi terkait dari beberapa logam dan metaloid mengurangi nilai kualitas air dan membatasi peluang penggunaan akhir.

Hujan deras pada bulan Agustus 2011 menyebabkan limpasan saluran pengalihan CRSB sepanjang dinding cabang selatan yang memisahkannya dari Kepwari Lake. Sekitar 30 m dari dinding gagal, dan 2 GL air CRSB mengalir melalui Kepwari Lake, menguras melalui gorong-gorong di timur laut dan sisi tenggara danau (McCullough et al. 2013).

Pembilasan yang tidak disengaja ini memiliki efek substansial meningkatkan kualitas air dan nilai ekosistem (et al. McCullough 2012), memperlihatkan bahwa mempertahankan danau sebagai sistem aliran-lewat mungkin akan memberikan strategi penutupan danau praktik kerja unggulan. Aliran-lewat musiman yang diharapkan menghasilkan sebuah danau payau terstratifikasi termal musiman penetral circum-pH (Gambar 2).

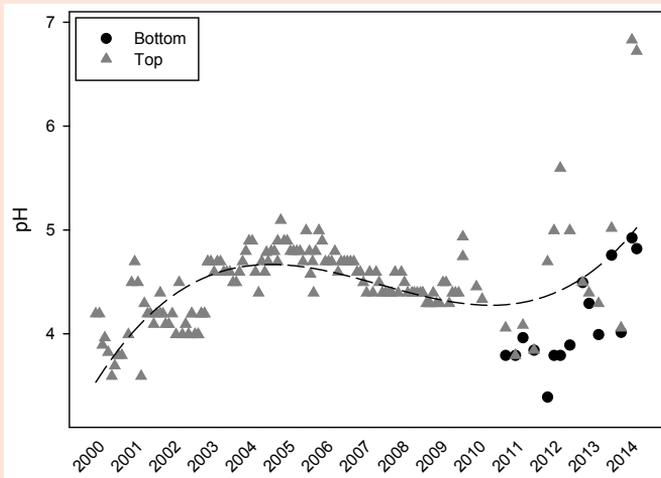
Setelah keterlibatan luas pemangku kepentingan, termasuk presentasi masyarakat, dan diizinkan oleh regulator negara bagian, percobaan aliran-lewat diusulkan guna menilai manfaat pilihan manajemen praktik unggulan tersebut. Percobaan tersebut berjalan antara tahun 2012 hingga 2014 dengan lebih dari dua tahun aliran dan satu tahun tidak ada aliran karena curah hujan yang rendah. Penilaian triwulanan biota dan kimia dari kedua Lake Kepwari dan CRSB, serta pelaporan tahunan temuan kepada regulator dan masyarakat adalah komponen utama percobaan tersebut.



Gambar 2: Model konseptual dari (A) desain aliran-langsung Danau Kepwari yang menunjukkan jalur CRSB historikal berwarna hitam, diversifikasi aliran sungai yang terdahulu dalam warna abu-abu tua dan jalur danau berwarna abu-abu muda; dan (B) sumber air tanah DAL yang ditunjukkan dengan panah warna merah muda, basin dan neraca cair selama mengalir.

Pemantauan kualitas air

Hasil pemantauan memperlihatkan bahwa kualitas air sungai di hilir tidak signifikan terdegradasi oleh aliran-lewat, karena volume kurasan terbesar terjadi terutama selama arus CRSB tinggi dengan konsekuen tinggi pengenceran air danau. Selanjutnya, kualitas air sungai sebenarnya dapat ditingkatkan relatif ke aliran hulu melalui tangkapan sedimen, termasuk bentuk partikulat nutrisi, oleh benthos danau dan penyingkiran bentuk-bentuk larut fosfor oleh endapan gabungan dengan spesies aluminium terlarut yang hadir dalam danau (McCullough dan Schultze 2015). Pemantauan memperlihatkan bahwa, setelah pelaksanaan rezim aliran-lewat, pH danau lebih tinggi dari kadar historis dan yang penting, adalah pada tren yang meningkat (Gambar 3).



Gambar 3: Grafik historikal seri waktu kadar pH Danau Kepwari, selama dan sesudah aliran-langsung dimulai (setelah McCullough et al. 2010; McCullough et al 2012). Gari regresi bertitik-titik mengindikasikan tren kadar pH air permukaan dalam sepanjang waktu.

Kesimpulan

Strategi aliran-lewat danau telah berhasil sangat baik dalam situasi ini karena (a) saluran sungai itu dapat dipertahankan dalam sejarahnya dan (b) kualitas air sudah terdegradasi oleh penggunaan lahan di hulu, sehingga mengurangi risiko untuk nilai hilir sungai yang ditimbulkan oleh penambahan DAL. Temuan dari ulasan pustaka sebelum awal proyek, ditambah dengan keterlibatan awal dan teratur, memberikan keyakinan kepada pemangku kepentingan bahwa pendekatan adalah praktik kerja unggulan internasional. Namun, perlu dicatat bahwa aliran-lewat mungkin bukan praktik kerja unggulan untuk semua penutupan danau pit, terutama yang dengan kualitas air sungai hilir yang baik dan terkait dengan nilai tinggi penggunaan akhir. Setiap kasus harus dinilai dalam konteks spesifik-lokasi.

REFERENSI

- McCullough, CD, Schultze, M (2015). 'Riverine flow-through of mine pit lakes: improving both mine pit lake and river water quality values?', dalam Proceedings of the 10th International Conference on Acid Rock Drainage and IMWA 2015, Santiago, Chile, 28 April - 1 May 2015, Bagian 16, 'Pit Lakes', hlm. 10.
- McCullough, CD, Lund, MA, Zhao, LYL (2010). 'Mine voids management strategy (I): pit lake resources of the Collie Basin', Department of Water Project Report MiWER/Centre for Ecosystem Management Report 2009-14, Edith Cowan University, Perth, Australia, hlm. 250, laporan kepada Departemen Air yang tidak diterbitkan.
- McCullough, CD, Kumar, NR, Lund, MA, Newport, M, Ballot, E, Short, D (2012). 'Riverine breach and subsequent decant of an acidic pit lake: evaluating the effects of riverine flow-through on lake stratification and chemistry', pp. 533-540 in Proceedings of the International Mine Water Association (IMWA) Congress, Bunbury, Australia.
- McCullough, CD, Ballot, E, Short, D (2013). 'Breach and decant of an acid mine lake by a eutrophic river: river water quality and limitations of use', pp. 317-327 in Proceedings of the Mine Water Solutions 2013 Congress, Lima, Peru, Infomine Inc.

6.7 Lokasi pertambangan brownfield

Proyek pertambangan brownfield terjadi pada atau sangat dekat dengan operasi pertambangan yang sudah ada sebelumnya atau saat ini, berbeda dari proyek pertambangan greenfield, yang dikembangkan di daerah-daerah yang sebelumnya tidak ditambang. Lokasi brownfield memberikan kesempatan tersebut guna menerapkan praktik-praktik yang mengarah ke lokasi yang lebih tua, di mana praktik masa lalu mungkin telah mengakibatkan manajemen yang lebih buruk terhadap risiko DAL. Dimulainya kembali tambang juga dapat memberikan nilai sosial ekonomi yang membaik dari lokasi bersama-sama dengan standar perlindungan lingkungan yang lebih tinggi.⁴⁹

Perluasan proyek yang telah disetujui dan pertambangan operasi di sebuah lokasi yang ada bukan fokus di bagian ini. Fokus di sini adalah di lokasi di mana telah terjadi perubahan-langkah peraturan dan/atau harapan masyarakat antara saat operasi bekas lokasi berhenti dan saat operasi baru dimulai. Perubahan kepemilikan atau mulai kembali setelah masa tidak aktif tersebut dapat menimbulkan peluang maupun risiko untuk penilaian dan pengelolaan DAL dan untuk merancang penutupan.

Peluang-peluang:

- Informasi yang cukup mungkin telah dikumpulkan di lokasi geologi dan geokimia. Termasuk di dalamnya data yang dikumpulkan selama operasi pertambangan, selain eksplorasi. Sebaliknya, lokasi greenfield harus bergantung pada data eksplorasi atau, jika terdapat operasi yang sudah ada di wilayah geologi yang sama, data dari lokasi tersebut dapat memungkinkan pemahaman yang lebih luas tentang kemungkinan risiko DAL.
- Lama waktu mungkin telah memungkinkan penilaian pelapukan dan evolusi sifat bahan limbah.
- Satuan batuan sisa dapat diakses di atas tanah untuk tambahan sampling dan analisis guna memperoleh pemahaman yang lebih besar tentang karakteristik DAL dan model produk pelapukan jangka panjang untuk menginformasikan pengelolaan limbah, desain bentuk lahan, pengelolaan air, rencana revegetasi dan desain penutupan.
- Jika tersedia, jangka panjang dataset monitoring air dapat dievaluasi ulang untuk menginformasikan pengembangan strategi pemantauan DAL.
- Sistem pengelolaan praktik kerja unggulan dapat disusun dengan membangun pengetahuan dasar yang diperoleh dari kegiatan masa lalu.
- Saat metode praktik kerja unggulan dapat diimplementasikan untuk meminimalkan DAL dari limbah yang ada di lokasi, secara paralel dengan manajemen yang efektif limbah yang baru diproduksi untuk mengurangi kewajiban pengelolaan limbah keseluruhan lokasi.

Risiko-risiko:

- penilaian uji kelayakan⁵⁰ dilakukan sebagai bagian dari proses lokasi akuisisi secara substansial mengabaikan kewajiban DAL untuk proyek baru dengan tanggung jawab yang kurang untuk:
 - tingkat risiko DAL karena karakterisasi limbah tidak cukup atau kurang tepat dan/atau data pemantauan kualitas air dari operasi pertambangan sebelumnya
 - praktik pengelolaan limbah yang buruk secara historis, seperti pemisahan atau enkapsulasi limbah yang kurang memadai
- kegiatan perawatan dan pemeliharaan untuk mengelola air (limpasan permukaan, rembesan air tanah, mengisi meluapnya lubang terbuka atau pekerjaan bawah tanah) di lokasi selama periode dormansi diperpanjang terbatas atau tidak ada
- data pemantauan air (air permukaan atau air tanah) yang mengumpulkan pemahaman tentang tren jangka panjang di DAL
- kurangnya kepercayaan dan perlawanan masyarakat pada proyek penambangan karena warisan masa lampau

49 Lihat studi kasus Savage River di Bagian 5.

50 Lihat bagian 5.3.

- keterlambatan perizinan proyek karena kebutuhan untuk melakukan penyelidikan yang memakan waktu dan mahal karena sebelumnya kekurangan data yang kuat terhadap risiko DAL.

Kunci untuk pengelolaan lokasi brownfield DAL yang sukses adalah memahami perbedaan dari lokasi greenfield dengan mengatasi masalah berikut:

- Gunakan karakterisasi DAL yang ditargetkan untuk memahami bagaimana bahan limbah telah berubah sejak ditambang dan ditempatkan di WRD atau TSF.
- Desain dan laksanakan pengelolaan limbah dan penutupan rencana operasional untuk memperhitungkan karakteristik fasilitas limbah yang ada.
- Pahami interaksi hidrologi antara gelombang dan air permukaan serta karakterisasi dangkal dan akuifer dalam.
- Cirikan lingkungan penerima dengan menentukan nilai-nilai lingkungan yang ada saat itu maupun potensinya (yaitu, nilai-nilai apa yang mungkin terdapat di sana tanpa adanya dampak dari operasi yang ada).

6.8 Lokasi-lokasi tambang yang terbengkalai/warisan

Lokasi warisan⁵¹ menimbulkan banyak tantangan yang sama seperti lokasi brownfield kecuali bahwa lokasi tersebut tidak berada di bawah kepemilikan perusahaan tambang dengan tanggung jawab untuk perawatan atau pemeliharaan warisan dan kemungkinan besar tidak akan dibuka kembali (Lada et al. 2014). Ini berarti bahwa dalam keadaan apa pun lokasi telah ditinggalkan di sana akan perlu penilaian lokasi dan perencanaan yang sistematis untuk mengelola warisan DAL. Oksidasi sulfida dapat sering berada pada stadium lanjut, sehingga dampak hilir yang luas yang perlu diukur dan dikurangi.

Menurut pengaturan standar (by default), banyak lokasi-lokasi ini sekarang menjadi tanggung jawab pemerintah dan pemilik lahan. Program lokasi warisan adalah yang diperlukan untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan lokasi atas dasar risiko ekonomi lingkungan dan sosial serta kesempatan untuk membawa nilai terbesar dari kegiatan intervensi. Kerangka kerja strategis Australia untuk mengelola tambang yang terbengkalai (MCMPR-MCA 2010) mendorong pendekatan multidisiplin untuk memastikan agar nilai-nilai lokasi-lokasi tersebut diakui, data dikumpulkan dan dikelola, penilaian risiko dilakukan dan lokasi dikelola dalam kemitraan dengan organisasi lain mana pun praktis.

Penggunaan alternatif lahan juga harus dievaluasi untuk mencari peluang ekonomi. Misalnya, DAL&Art⁵² di Vintondale, USA, adalah sebuah taman yang menggunakan karakteristik DAL (dari pertambangan batubara) melalui kombinasi seni dan ilmu pengetahuan guna menciptakan pembaruan dalam lanskap yang dinyatakan terdegradasi. Ruang terbuka yang luas untuk rekreasi, acara santai dan acara publik telah diciptakan di beberapa direhabilitasi pertambangan uranium lokasi warisan DAL di mantan Jerman Timur.

Kunci keberhasilan dalam mengelola DAL di lokasi tersebut mirip dengan yang untuk lokasi brownfield. Namun, permasalahan berikut juga perlu ditangani:

- Menetapkan tujuan penutupan.
- Mengidentifikasi risiko utama yang tengah berjalan maupun di masa depan dan kewajiban yang ditimbulkan oleh lokasi dan mengembangkan rencana pengelolaan/perbaikan berdasarkan pada identifikasi tersebut.
- Membangun sebuah tim yang memenuhi syarat sesuai dengan keterampilan manajemen multidisiplin dan proyek.
- Mengembangkan pemahaman yang lengkap dari lokasi dengan mengumpulkan informasi sejarah dalam database dan manajemen pengetahuan sistem spasial, serta melakukan penyelidikan baru jika diperlukan.

⁵¹ Lihat juga Bagian 8.6.

⁵² <http://www.amdandart.info/>.

- Memahami dan menangani harapan pemangku kepentingan, termasuk nilai-nilai warisan budaya dan industri adat.
- Pertimbangkan cara-cara inovatif untuk mengatasi permasalahan spesifik; misalnya, kemitraan publik-swasta untuk mendanai dan mengelola lokasi seperti yang di tambang Britannia di British Columbia.

Perjanjian kemitraan nasional saat ini antara pemerintah Australia dan Northern Territory untuk merehabilitasi warisan tambang tembaga dan uranium Rum Jungle merupakan contoh penerapan prinsip-prinsip praktik kerja unggulan di atas (Studi Kasus 10).

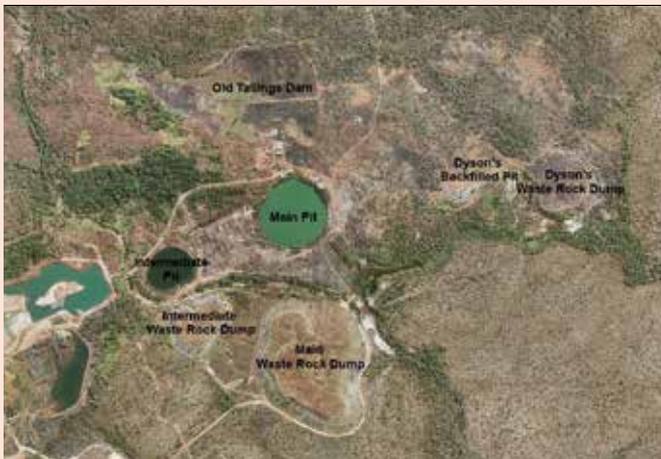
STUDI KASUS 10: Perencanaan rehabilitasi untuk lokasi warisan Rum Jungle, Northern Territory

Koteks

Bekas lokasi tambang Rum Jungle terletak dekat Batchelor di Northern Territory, sekitar 105 km sebelah selatan Darwin melalui jalan darat. Antara tahun 1954 hingga 1971, Rum Jungle memproduksi 3.530 ton uranium oksida dan 20.000 ton konsentrat tembaga. Rincian lengkap tentang sejarah dan daftar komprehensif laporan teknis bersejarah dan saat ini dapat ditemukan di www.nt.gov.au/d/rumjungle/.

Seperti diperlihatkan dalam Gambar 1, lokasi ini terdiri dari:

- timbunan tiga limbah batuan—Main, Intermediate dan Dysons
- dua pit tambang dipenuhi air—Main dan Intermediate
- satu pit tambang diuruk dengan tailing dan ditidih dengan tanah yang terkontaminasi dan batuan—Dysons.



Gambar 1: Peta situs menunjukkan lokasi utama

Metode penempatan untuk batuan sisa dan pemrosesan tailing selama ini mengakibatkan oksidasi mineral sulfida dalam limbah dan produksi volume besar asam DAL dan konsentrasi tinggi tembaga dan logam berat lainnya yang terus berlanjut. Hasil oksidasi tersebut diguyur ke cabang timur yang berdekatan dari Finnis River selama musim hujan, yang mengakibatkan menipisnya kehidupan air berkilo-kilometer di sepanjang sungai tersebut dan selama puluhan tahun.

Untuk mengatasi masalah tersebut lokasi ini awalnya direhabilitasi antara tahun 1982 hingga 1986, dan ini diikuti oleh program pemantauan kinerja 12 tahun (Pemerintah Northern Territory 2013). Setelah pekerjaan rehabilitasi selesai, penilaian teknis yang komprehensif menentukan bahwa kriteria rekayasa dan lingkungan yang ditetapkan untuk proyek rehabilitasi telah berhasil dipenuhi (Pidsley 2002). Memang, standar kinerja tersebut harus terus dipenuhi sampai hari ini.

Meskipun pertengahan tahun 80-an pekerjaan mewakili praktik kerja unggulan internasional pada saat itu, namun tidak menghasilkan kondisi akhir untuk lokasi yang akan memenuhi kualitas air kontemporer atau lokasi standar pembersihan yang terkontaminasi. Kemajuan dalam pemahaman desain lapisan penutup telah memperlihatkan bahwa multi-lapisan penutup yang ditempatkan di atas batuan sisa sulfida terlalu tipis untuk menampung siklus pembasahan–pengeringan yang terpapar pada iklim musiman basah–kering, dengan terjadinya keretakan pada lapisan tanah liat yang dipadatkan (Taylor et al. 2003). Selain masalah teknis, pekerjaan original diselesaikan tanpa masukan dari pemilik lokasi tradisional Aborigin.

Sejak tahun 2009, Northern Territory (melalui Dinas Pertambangan dan Energi) dan pemerintah Australia telah bekerja di bawah perjanjian kemitraan nasional guna meningkatkan pemeliharaan lokasi dan pemantauan lingkungan, serta mengembangkan strategi rehabilitasi perbaikan yang konsisten dengan pandangan dan kepentingan pemilik tradisional (Laurencont & Rider 2014).

Karakterisasi geokimia batuan sisa

Pertimbangan utama untuk mengembangkan skenario rehabilitasi adalah upaya untuk memahami sifat-sifat geokimia dari bahan limbah di WRD yang ada dan pit yang diuruk. Proses geokimia terjadi dan sejauh mana materi sulfida telah teroksidasi perlu diketahui untuk menilai kemungkinan efektivitas berbagai potensi strategi manajemen masa depan. Informasi tersebut akan digunakan untuk memprioritaskan bahan limbah dalam konteks strategi pemantauan yang paling efektif—misalnya, sebanyak mungkin relokasi sisa sulfida yang bermuatan bahan tinggi di bawah muka air tanah di pit yang berisi air yang ada untuk mencegah oksidasi lebih lanjut dan asam. Dalam konteks ini, total kapasitas tambang terbuka Main dan Intermediate mewakili sekitar 50% dari total volume batuan sisa dan tanah terkontaminasi yang terkandung dalam WRD dan Dysons tambang terbuka (ditimbun).

Dua kampanye sampling telah selesai selama empat tahun terakhir untuk mengkarakterisasi status saat ini dari bahan yang terkandung dalam WRD dan pit yang diuruk. Sebuah penyelidikan awal ke dalam karakteristik geokimia limbah yang terkandung dalam tiga WRD dan di pit Dysons yang diuruk saat berjalan, selesai pada tahun 2012 (SRK Consulting 2012). Empat parit digali di setiap WRD untuk menyediakan cakupan spasial yang wajar dari permukaan masing-masing timbunan, dengan lokasi parit tersebut diinformasikan oleh informasi sejarah tentang pembangunan WRD. Penyelidikan ini menyimpulkan bahwa bahan limbah yang sangat heterogen, dengan hubungan umumnya buruk antara bidang pH dan EC. Oksidasi ditemukan menjadi sangat tidak lengkap di WRD utama dan menengah, dengan kadar oksidasi yang lebih besar untuk WRD Dysons.

Awalnya diantisipasi bahwa kadar oksidasi dan asal litologi limbah mungkin dapat disimpulkan dari pengamatan visual. Pendekatan ini akan mengurangi pekerjaan karakterisasi laboratorium, dengan sampel lebih sedikit yang perlu dianalisis lebih rinci untuk memberikan gambaran yang komprehensif tentang karakteristik geokimia limbah. Sayangnya, karakteristik geokimia seperti kadar oksidasi, potensi kemasaman dan muatan logam yang dapat dilindi tidak berkorelasi dengan karakteristik visual.

Namun, ditemukan bahwa pada umumnya korelasi yang baik antara nilai pH NAG dan temuan dari ABA (yang, bahan positif NAPP menghasilkan NAG pH asam).

SRK Consulting (2012) mengidentifikasi bahwa, dengan pengecualian WRD Dysons, semua struktur yang berisi sulfida sisa substansial (kemasaman yang baru mulai) dengan potensi untuk terus mengoksidasi dan untuk menghasilkan kondisi DAL ke masa depan. Sejah ini muatan sisa sulfida tertinggi terdapat pada WRD Intermediate.

Sampel penggalian yang dilakukan untuk pekerjaan awal ini memberikan pemahaman yang berharga tentang sifat limbah yang terdapat dalam WRD, namun hal itu terbatas pada maksimal kedalaman 10 m dalam WRD. Ini berarti bahwa hanya 50-60% bagian atas profil limbah di WRD yang merupakan sampel. Selain itu, jumlah kemasaman yang terkandung dalam limbah tidak dihitung oleh program karakterisasi ini. Kemasaman yang ada terdiri dari dua komponen:

- kemasaman langsung yang dapat ditrasi terdiri dari asam sulfat dan asam mineral
- kemasaman yang ada dalam bentuk mineral sekunder yang sulit larut seperti jarosit dan alunite.

Informasi tentang jumlah kemasaman yang ada diperlukan untuk mengestimasi potensi bahan ini untuk melindi zat terlarut, sehingga strategi yang paling tepat untuk pengelolaannya masa depan dapat dikembangkan. Pentingnya menentukan jumlah kemasaman yang ada di batuan sisa yang sebagian teroksidasi di brownfield dan warisan lokasi ditekankan dalam Bab 4.

Penyelidikan tambahan yang dilakukan pada tahun 2014 untuk mencirikan profil lengkap limbah dari permukaan WRD ke permukaan tanah asli maupun menentukan laju oksidasi yang lebih baik dan adanya mineral asam sulfat sekunder seperti jarosit. Pit-pit uji digali dengan menggunakan ekskavator 35 ton dan diperpanjang dari permukaan atas WRD sampai kedalaman tanah alami (hingga 21 m). Proses penggalian ini adalah kegiatan tambang ulang skala kecil, dengan akses ke kedalaman yang membutuhkan pemotongan lateral yang besar dengan benching menengah. Jejak penggalian terdalam diukur 100 m x 50 m (Gambar 2).



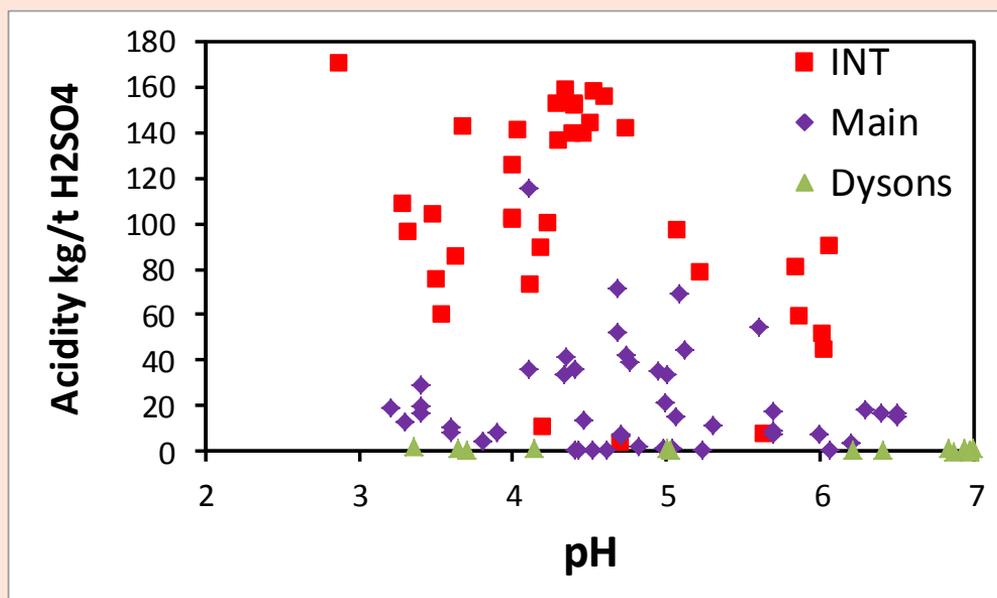
Gambar 2: Pit contoh yang diekskavasi (level bench 15m) di Main WRD. Skala gambar diberikan oleh seseorang bertinggi 2 m berdiri di sisi kanan.

Sampel dikumpulkan pada interval vertikal 1 m atau di mana perubahan diamati pada litologi. Ekskavator tersebut dilengkapi dengan ember bersaringan jala 7,5 cm di mana sampel meruah dikumpulkan. Sampel meruah dibawa ke permukaan dan ember diguncang untuk memisahkan fraksi <7,5 cm, dengan bahan >7,5 cm dimasukkan ke satu sisi. Dua puluh empat kilogram sub-sampel terdiri dari tumpukan <7,5 cm kemudian dibawa untuk karakterisasi. Dengan ini berarti, indikasi yang baik diperoleh dari distribusi ukuran partikel batuan pada setiap interval vertikal 1 m. Informasi tersebut diperlukan untuk menginformasikan penanganan material, untuk desain material penyimpanan limbah baru yang diusulkan dan untuk skala informasi karakterisasi geokimia dengan sebagian besar massa bahan.

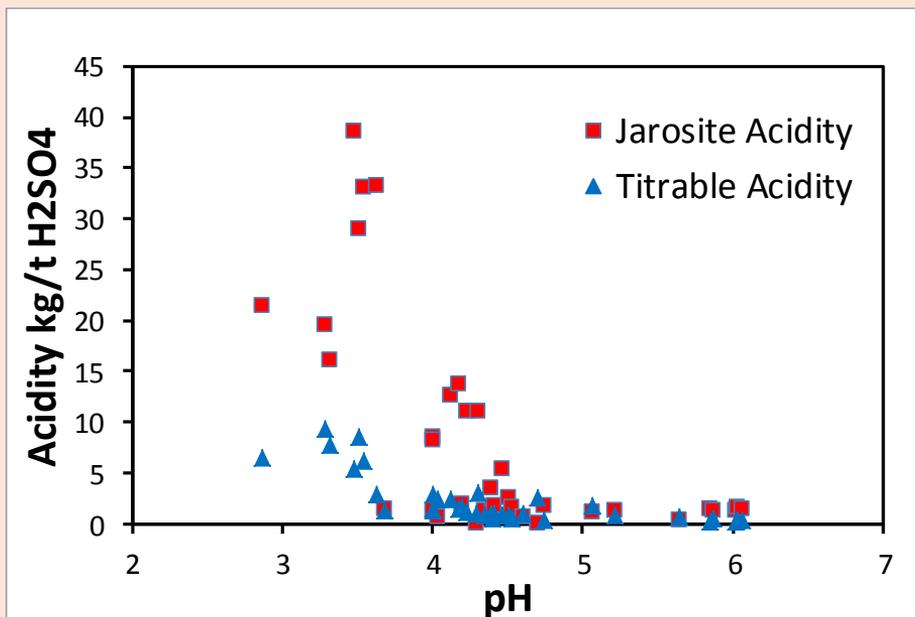
Temuan dari uji geokimia statis

Data kemasaman baru mulai (dinyatakan sebagai setara H_2SO_4 kg/t) yang diperoleh dari program ini diringkas dalam Gambar 3. Kemasaman baru mulai (potensi pengasaman, AP) mengacu pada kemasaman yang dapat dihasilkan jika semua sulfida yang tersisa dalam bahan yang sebagian teroksidasi adalah untuk mengoksidasi. WRD Intermediate (INT pada Gambar 3) sejauh ini tertinggi yang bermuatan kemasaman yang baru mulai.

Gambar 4 memperlihatkan distribusi kemasaman yang ada antara kemasaman jarosit dan kemasaman langsung yang dapat dititrasi dalam WRD Intermediate. Hal ini jelas dari data tersebut bahwa kegagalan untuk memperhitungkan komponen kemasaman jarosit akan berakibat sangat mengecilkan muatan yang ada kemasaman bahan ini, dan karenanya jumlah penetral yang perlu ditambahkan untuk memperhitungkan total kemasaman yang ada.



Gambar 3: Perbandingan kemasaman yang baru mulai di ketiga WRD



Gambar 4: Perbandingan antara kemasaman yang dapat dititrasi dan kemasaman jarosit pada WRD sedang

Strategi rehabilitasi yang diusulkan

Strategi yang dipilih untuk rehabilitasi lokasi melibatkan pengurukan pit terbuka utama dengan muatan sulfida tertinggi (kemasaman yang baru mulai) batuan sisa (semua Intermediate dan bagian dari Main WRD), dengan konsolidasi batuan sisa yang tersisa dan bahan terkontaminasi lainnya di lokasi ke dalam fasilitas penyimpanan limbah di atas kadar yang didesain dengan tujuan baru. Opsi yang disukai tersebut diidentifikasi menggunakan beberapa alat analisis perhitungan (Pemerintah Northern Territory 2013). Proses analisis beberapa perhitungan dibuat berdasarkan empat masalah utama:

- lingkungan
- kelayakan teknis
- budaya
- keuangan.

Setiap komponen individual masalah ini telah dihitung pada kinerja relatif yang diproyeksikan terhadap tujuan rehabilitasi, dengan bobot konsensus yang diterapkan untuk mendapatkan nilai akhir yang diberikan.

Strategi pembendungan limbah memerlukan sifat geokimia bahan untuk dipahami dan ditangani. Dalam kasus bahan yang akan ditempatkan di pit, kandungan sulfida sisa tidak akan menjadi masalah karena penempatan di bawah muka air tanah akan mencegah oksidasi sulfida sisa di masa depan. Namun, untuk bahan ini, kemasaman yang ada mungkin perlu dinetralkan guna mengurangi potensi pencemaran air tanah oleh kemasaman dan logam yang terlarut.

Laboratorium uji kerja titrasi telah mengindikasikan bahwa pH 7 adalah target pH optimal untuk menyingkirkan logam dalam hal sebagian bahan yang sebagian teroksidasi perlu dinetralkan untuk penempatan di fasilitas pembendungan limbah baru.

Kebutuhan netralisasi parsial atau lengkap dari bahan yang akan ditempatkan di pit dinilai dengan analisis sensitivitas output pemodelan transportasi kimia hidrogeo dari pembendungan di dalam pit.

Desain fasilitas penyimpanan limbah baru kelas atas diperlukan untuk meminimalkan potensi masa depan untuk oksidasi sulfida residu maupun jumlah infiltrasi air (transportasi media untuk produk oksidasi) melalui permukaan fasilitas. Saat ini direncanakan untuk menambah penetral yang cukup untuk bahan yang sudah ditempatkan untuk menetralkan kemasaman yang ada.

Kesimpulan

Rum Jungle merupakan contoh lokasi yang awalnya terbelah dan pada dasarnya tidak terdapat rehabilitasi bahan sulfida reaktif. Konsekuensinya adalah kontaminasi utama pada sungai penerima DAL. Suatu prestasi pertama pada rehabilitasi dilakukan pada pertengahan tahun 80-an dengan investasi amat besar sekitar \$20 juta (dolar tahun 1980). Banyak aspek pekerjaan saat itu merupakan praktik kerja unggulan di dunia, dan target kinerja (persentase penurunan infiltrasi ke permukaan WRD dan persentase penurunan muatan kontaminan hilir) tercapai dan dipertahankan. Namun, hasil akhirnya tidak memenuhi kriteria kualitas air saat itu untuk perlindungan lingkungan. Selain itu, desain lapisan penutup kurang tepat untuk iklim musiman basah-kering, dan kinerja sistem penutup terus memburuk. Faktor-faktor ini, ditambah dengan kenyataan bahwa pemilik lokasi tradisional Aborigin tidak diajak berkonsultasi tentang pekerjaan rehabilitasi asli, telah menyebabkan kebutuhan secara mendasar untuk meninjau kembali tujuan dan strategi rehabilitasi lokasi. Kini diperkirakan akan menelan biaya lebih dari \$200 juta untuk menerapkan strategi rehabilitasi yang diinginkan.

Pembelajaran primer dari studi kasus ini adalah bahwa kegagalan untuk mencegah terjadinya DAL dari awal dapat menyebabkan tindakan perbaikan yang sangat mahal yang perlu dilakukan di masa depan. Pembelajaran sekunder adalah bahwa setiap tindakan perbaikan tersebut harus dipikirkan dengan baik-baik dan ditetapkan jangkauannya (termasuk aspek sosial dan budaya) sehingga menghindari harus kembali lagi pada biaya masa depan yang lebih besar.

REFERENSI

Laurençon, T, Rider, M (2014). 'The Rum Jungle National Partnership Agreement', pp. 125-130 in Miller, H, Preuss, L (eds), Proceedings of the Eighth Australian Workshop on Acid and Metalliferous Drainage, Adelaide, South Australia 29 April - 2 May 2014, JKTech Pty Ltd, Brisbane.

Northern Territory Government (2013). 'Former Rum Jungle mine site conceptual rehabilitation plan', May 2013, www.nt.gov.au/d/rumjungle/.

Pidsley, S (ed) (2002). 'Rum Jungle rehabilitation project monitoring report 1993-1998', Northern Territory Department of Infrastructure, Planning and Environment, Technical Report no. 01/2002, www.nt.gov.au/d/rumjungle/index.cfm?newscat1=&newscat2=&header=Historic%20Technical%20Reports.

SRK Consulting (2012). 'Geochemical characterisation of waste at the former Rum Jungle mine site', report DOR001 for NT Government Department of Resources, September 2012.

Taylor, G, Spain, A, Nefiodovas, A, Timms, G, Kuznetsov, V, Bennett, J (2003). Determination of the reasons for deterioration of the Rum Jungle waste rock cover, July 2003, www.nt.gov.au/d/rumjungle/index.cfm?newscat1=&newscat2=&header=Historic%20Technical%20Reports.

7.0 PENGOLAHAN DAL

Pesan-pesan kunci

- Pengolahan DAL dapat menjadi bagian yang mahal dari operasi penambangan dan bahkan berpotensi kewajiban pasca-penutupan yang lebih mahal jika kecenderungan bahan sulfida yang menghasilkan DAL tidak diakui dan dikelola dengan tepat sejak awal operasi penambangan.
- Tidak ada pendekatan pengolahan yang dapat memberikan solusi 'lepas-tangan' total, karena semua sistem membutuhkan pemantauan dan pemeliharaan jangka panjang.
- Perlakuan aktif dengan menggunakan reagen penetralisir berbasis kalsium kemungkinan akan tetap menjadi pilihan untuk beberapa waktu untuk pengolahan utama (tahap pertama) dari menengah ke kekuatan-tinggi (pH rendah) DAL, dan untuk menanggulangi sistem-sistem tersebut di mana laju aliran air masam berbagai macam ragam variasi.
- Sistem perlakuan pasif terbatas untuk situasi muatan kemasaman rendah di mana laju aliran air yang akan diproses relatif konstan melalui waktu.
- Sistem Wetland menawarkan pilihan yang menarik untuk pengolahan akhir air menjelang dinetralkan dan untuk keadaan di mana pH di atas pH 4,5.
- Penanganan kolam atau pit in situ yang berisi DAL memerlukan pengetahuan khusus tentang perilaku fisik dan kimia dari sistem-sistem tersebut untuk berhasil.

7.1 Mengapa dan kapankah harus mengolahnya?

Bisnis yang masuk akal dan baik, selain menjadi praktik unggulan, untuk menghindari dan meminimalkan produksi DAL (menggunakan metode yang dijelaskan dalam Pasal 6), dan untuk menangani DAL hanya sebagai pilihan terakhir jika pendekatan-pendekatan lain telah gagal.

Penanganan DAL perlu dipertimbangkan tidak hanya untuk perlindungan nilai-nilai lingkungan dari aliran air namun juga untuk kasus-kasus di mana:

- penggunaan ulang air dari tambang atau proses diperlukan di daerah di mana pasokan air yang tersedia terbatas
- proses atau peralatan penting lainnya membutuhkan perlindungan dari korosi atau dari pencemaran dengan scaling
- air dalam pit atau pekerjaan bawah tanah harus disingkirkan untuk mendapatkan kembali akses ke sumber daya bijih (ini merupakan faktor sangat penting dalam konteks sterilisasi sumberdaya)
- pemulihan logam komersial merupakan suatu kemungkinan
- air tanah terkontaminasi oleh segumpal DAL dan gumpalan perlu diremediasi.

DAL yang dihasilkan selama operasi sering dapat dikelola dengan biaya yang relatif lebih rendah dibandingkan setelah penutupan—contohnya, dengan menyimpan DAL dalam proses atau air kolam sirkuit, atau dengan pembuangan gabungan bersama tailing alkali (bagian tersembunyi dari biaya produksi). Pada penutupan, pilihan bagi manajemen operasional tidak lagi tersedia.

Ada kemungkinan bahwa persyaratan untuk pengelolaan DAL pasca-penutupan mungkin belum diakui selama operasi karena luasnya masalah masa depan tersembunyi oleh waktu tunda yang panjang, ditambah dengan kurangnya data pemantauan yang tepat. Kemungkinan besar situasi ini terjadi jika belum ada pengujian statis dan kinetik yang cukup terhadap limbah.

Kontaminasi air tanah oleh operasi pertambangan secara historis kurang diperhatikan di Australia daripada kontaminasi air permukaan. Hal ini sebagian besar mungkin disebabkan banyak tambang yang jauh dari persaingan pengguna air tanah. Namun, di beberapa lokasi di Australia, dan terutama di Uni Eropa dan di Amerika Serikat, air tanah kontaminasi oleh pertambangan memerlukan tindakan perbaikan yang sangat mahal (lihat, misalnya, Brown et al. 2009).

Mencegah penyebaran lebih lanjut dari zat terlarut dalam air tanah oleh pembendungan dan pemulihan ('memompa dan mengolah') dapat menjadi proposisi yang sulit, mahal dan berjangka panjang. Aturan yang umum adalah bahwa satu tahun pencemaran air tanah membutuhkan bertahun-tahun pompa dan pengolahan untuk memulihkan gumpalan tersebut. Akibatnya, penekanan dalam desain dan lokasi WRD, stockpile bijih dan TSF di lokasi tambang baru harus pada pencegahan atau minimalisasi dampak air tanah di masa depan.

Tidak ada pendekatan pengolahan tunggal yang dapat menyediakan solusi 'cuci-tangan' total, karena semua sistem memerlukan tingkat pemantauan dan pemeliharaan berjangka panjang. Pemilihan metode pengolahan DAL (atau kombinasi metode) yang tepat selalu tergantung pada kondisi spesifik lokasi, termasuk komposisi air dan pengolahan target.

Proses pengolahan secara keseluruhan (termasuk lumpur pengendapan dan pembuangan) perlu dinilai secara sistematis sebelum pilihan yang paling hemat biaya dapat diidentifikasi, dan mungkin membutuhkan keahlian spesialis pengolahan air. Teknologi pengolahan DAL yang diuraikan dalam bagian ini umumnya berlaku untuk air permukaan maupun air tanah yang diekstraksi. Teknologi yang spesifik untuk pengolahan tanah in situ diidentifikasi dalam Bagian 7.3.3.

7.2 Pertimbangan-pertimbangan umum beberapa sistem pengolahan

Faktor utama yang perlu ditangani saat memilih metode pengolahan air yang paling tepat adalah sebagai berikut:

- *Kimia air.* Logam/metaloid dan pH (yaitu, kemasaman) adalah target yang paling umum untuk pengolahan DAL, tetapi penyingkiran ion utama, seperti magnesium dan sulfat, juga mungkin diperlukan.
- *Volume air (atau laju aliran).* Biaya pengolahan air adalah fungsi dari laju aliran yang akan diproses maupun komposisi air. Dalam banyak kasus, laju aliran merupakan pendorong utama untuk ukuran sebuah sistem pengolahan, apakah aktif atau pasif. Upaya harus dilakukan untuk membatasi volume/laju aliran yang membutuhkan pemrosesan, baik selama operasi dan setelah penutupan.
- *Target pengolahan.* Target untuk kualitas air yang diolah akan spesifik-lokasi dan tergantung pada sejumlah faktor, termasuk permasalahan yang berkaitan dengan perlindungan tanaman dan peralatan dari korosi dan perlindungan nilai-nilai lingkungan penerima perairan.

Asal mula target pengolahan memerlukan pertimbangan dari kerangka penilaian risiko rinci dalam ANZECC-ARMCANZ (2000a).⁵³ Pohon keputusan dan perangkat lunak komputer untuk membantu dengan pemilihan DAL tersebut. Metode pengolahan DAL dan estimasi biaya untuk berbagai teknologi dijelaskan dalam Taylor et al. (2005), dalam pedoman yang diberikan oleh Dewan Teknologi dan Peraturan Antar Negara Bagian (Interstate Technology and Regulatory Council (ITRC))⁵⁴ di AS dan dengan paket perangkat lunak AMDTreat (lihat

⁵³ As described in Section 5.3. The Mount Morgan case study in this section demonstrates an application of this approach. Refer also to the *Risk management leading practice handbook* (DIIS 2016f) for a broader coverage of this topic.

⁵⁴ <http://www.itrcweb.org/miningwaste-guidance>.

Glosarium) yang tersedia dari Kantor Penambangan Reklamasi Permukaan dan Penegakan AS (Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement (OSMRE)).⁵⁵ AMDTreat dapat membantu pengguna dalam mengestimasi biaya untuk memproses DAL menggunakan berbagai macam jenis perlakuan aktif dan pasif.

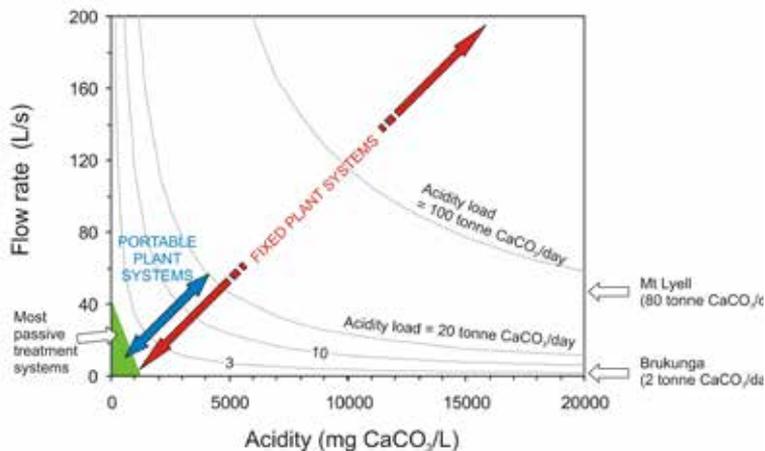
7.3 Teknologi pengolahan—aktif atau pasif?

7.3.1 Ikhtisar

Sistem pengolahan DAL dapat dikategorikan sebagai aktif atau pasif. Atribut umum sistem perlakuan pasif tidak ada atau minimalnya persyaratan untuk memompa aktif (listrik atau diesel), dan tidak ada persyaratan untuk penambahan bertenaga jarak jauh reagen kimia.

Apakah metode aktif atau pasif tepat untuk aplikasi DAL tertentu dapat ditentukan dengan menilai muatan kemasaman influen DAL. Pendekatan perlakuan pasif dapat menarik secara ekonomis dalam situasi yang tepat, namun memiliki beberapa keterbatasan yang signifikan. Yang paling tepat untuk pengolahan perairan dengan kemasaman rendah (<800 mg CaCO₃/L) dan muatan kemasaman rendah (100-150 kg CaCO₃ per hari), dan dengan laju aliran yang mantap. Solusi perlakuan pasif kurang tepat untuk tugas-tugas pemrosesan yang membutuhkan lebih dari sekitar setara 150 kg CaCO₃ per hari. Ada banyak contoh di mana aturan ini tidak diikuti dalam desain dan implementasi sistem perlakuan pasif, dan konsekuensi yang tak terelakkan telah kelebihan muatan dan kegagalan untuk memenuhi target pengolahan. Gambar 29 dapat digunakan untuk menyimpulkan penerapan sistem pengolahan DAL yang berbeda berdasarkan muatan kemasaman influen DAL.

Gambar 29: Pilihan pendekatan pengolahan yang sesuai pada awalnya dapat berdasarkan pada muatan



Sumber: Taylor et al. (2005).

Suatu sistem pengolahan lahan basah pasif yang gagal diperlihatkan pada Gambar 30. Lahan basah ini awalnya dirancang untuk mengolah air pH 5. Selama tiga tahun dioperasikan dan berhasil namun kewalahan saat volume besar rembesan asam mulai mengalir dengan deras secara tak terduga dari WRD tertutup yang berdekatan. Meskipun instalasi rekayasa saluran air kapur terbuka di hulu lahan basah, tak ada kapasitas penetral yang cukup untuk menangani muatan kemasaman yang meningkat.

⁵⁵ <http://amd.osmre.gov/>.

Figure 30: Wetland constructed to polish seepage from a covered WRD, during initial years of neutral drainage (left), and after it was overwhelmed and rendered ineffective by breakthrough of highly acidic and metal-rich seepage (right).



Dalam hal drainase tambang sedikit asam mendekati netral, seperti pH 5-8, arus yang sangat besar (dalam batas-batas yang ditentukan oleh waktu tinggal yang diperlukan dan area yang tersedia) dapat langsung diobati oleh sistem lahan basah dengan biaya lebih rendah dan dengan potensial output kualitas air yang lebih baik daripada yang dapat dicapai dengan pengolahan air aktif.

7.3.2 Sistem perlakuan aktif

Pengolahan yang disentralisasi

Pendekatan konvensional untuk pengolahan DAL aktif terpusat melibatkan penggunaan sebuah pabrik pengolahan air tetap (WTP) dengan air masam dipompa atau diarahkan dari satu atau lebih badan air tambang ke pabrik tersebut. Serangkaian proses digunakan untuk menetralkan air masam dan kemudian memisahkan padatan (endapan logam) dari air. Banyak alat bantu pemantau proses yang tersedia di WTP (laju aliran umpan, waktu tinggal, pencampuran kecepatan, waktu pencampuran, laju aerasi, laju selain reagen, laju selain flokulen, laju daur ulang dan sebagainya). Kesemuanya memungkinkan penyetelan operasi yang tepat untuk WTP guna mencapai aliran konstan limbah yang diproses menurut standar yang ditentukan.

Keuntungan dari WTP terpusat adalah bahwa WTP tersebut dapat direkayasa guna menampung berbagai muatan kemasaman (Gambar 29). Namun, pemilihan teknologi pengolahan yang tepat atau kombinasi dari teknologi yang akan memberikan layanan yang kuat dan ekonomis sangat tergantung pada komposisi air sumber dan target pengolahan yang diperlukan.

Empat jenis dasar teknologi perlakuan aktif adalah:

- pengendapan hidroksida logam dengan penambahan agen penetralisir untuk menaikkan pH, atau pengendapan sulfida logam
- pertukaran ion—menggunakan suatu lapisan damar untuk mengambil logam-logam dalam bentuk-bentuk muatan positif atau negatif
- pemisahan membran (osmosis, elektrodialisis)—hal ini akan menyingkirkan ion-ion garam maupun logam utama ke tingkat yang rendah
- sistem-sistem bioreaktor untuk menyingkirkan logam-logam dan sulfat.

Perhatikan bahwa pemisahan membran merupakan langkah pengolahan sekunder yang mengikuti tahap pertama netralisasi kemasaman oleh penyesuaian pH. Pra-perawatan ketat diperlukan untuk menyingkirkan zat terlarut (terutama, besi, mangan, dan kalsium sulfat dan karbonat) yang dapat dengan cepat membusukkan membran-membran yang amat mahal dan tak dapat dipulihkan kembali.

Sejauh ini bentuk biaya yang paling jamak dan umumnya termurah ialah pengolahan primer aktif netralisasi kimia dengan menggunakan WTP tersentral. Ini juga sama halnya dengan peralatan portabel dalam pengolahan in situ yang dapat menjadi pilihan yang tepat saat biaya pengumpulan dan pemompaan DAL ke WTP terpusat melebihi biaya pembangunan dan pengoperasian tempat pengolahan yang lebih kecil dan portabel (lihat Taylor et al. 2005 dan di bawah). Kebanyakan logam-logam terkait dapat disingkirkan dengan menaikkan pH ke tingkat yang dibutuhkan. Namun, merkuri (Hg), molibdenum (Mo), kromium-VI (kromat), arsen-III (arsenit) dan selenium tidak dapat dikelola hanya oleh pengendalian pH sendiri, dan memerlukan pengolahan tahap kedua (atau lebih). Merancang sebuah pabrik untuk mengolah DAL membutuhkan perhitungan tuntutan netralisasi air dan penyaringan uji kerja untuk menentukan yang mana dari berbagai penetralisir yang berpotensi dan tersedia yang akan menjadi biaya yang paling efektif untuk mencapai target pengolahan yang diperlukan.

Dua komponen kemasaman perlu dipertimbangkan: asam (H^+) dan nilai-nilai kemasaman mineral (laten).⁵⁶ Jumlah kemasaman dapat ditentukan dari konsentrasi logam terlarut dan pH dengan menggunakan alat seperti shareware ABATES (Waters et al 2014; lihat Glosarium).

Memilih bahan penetral yang paling tepat untuk aplikasi tertentu memerlukan pertimbangan:

- pH yang diperlukan untuk memenuhi target-target kualitas air
- biaya (biaya pasokan ditambah biaya penggunaan operasional)
- tingkat dan seberapa kenaikan pH
- kesehatan dan keselamatan kerja
- luasnya persiapan (seperti penggilingan) dan sistem pengiriman yang diperlukan
- tingkat dosis yang diperlukan (yaitu, massa penetralisir per m^3 air)
- waktu reaksi, termasuk kebutuhan untuk oksidasi
- kemudahan untuk menjadi stabil, volume dan properti kimiawi dari lumpur yang dihasilkan (perhatikan bahwa biaya pembuangan lumpur mungkin sebanding dengan biaya pengolahan awal).

Agen penetral yang paling umum digunakan untuk pengolahan berskala besar DAL adalah kapur (quicklime, kapur kering), soda kaustik (sodium hidroksida), magnesium hidroksida, magnesium oksida dan batuan kapur. Hal ini karena tersedianya reagen komersial tersebut, sifat non-proprietary-nya, keberadaan yang terbukti pencampuran dan dosis teknologi yang baik untuk digunakan, efektivitas biayanya serta properti kesehatan dan keselamatan untuk aplikasi skala besar yang dapat dikelola.

Faktor terpenting dalam pemilihan penetral adalah pH sasaran yang diperlukan untuk memenuhi tujuan pelepasan kualitas air. Sementara batuan kapur merupakan biaya reagen terendah, pH maksimal yang dapat dicapai sekitar 7. Hal ini sering tidak cukup tinggi untuk menyingkirkan logam seperti mangan, nikel, seng, kobalt dan kadmium ke tingkat yang berterima, sehingga kapur kering atau salah satu penetral lainnya yang tercantum di atas mungkin juga diperlukan.

Bioteq⁵⁷ (BioSulfide®) dan Paques⁵⁸ (THIOPAQ®) telah mengembangkan sistem-sistem rekayasa bakteri penurun sulfat yang dimasukkan ke dalam bioreaktor bertingkat tinggi mengurangi sulfat untuk menjadi sulfida dan sulfur. Proses ini dapat menghasilkan air yang bermuatan sulfat <300 mg/L dan juga menghilangkan logam/metaloid

⁵⁶ Didefinisikan dalam Bagian 2.2.

⁵⁷ <http://www.bioteq.ca>.

⁵⁸ <http://www.paques.nl>.

yang membentuk sulfida tak dapat larut (tembaga, kadmium, nikel dan timah, serta arsenik, selenium dan molibdenum). Teknologi tersebut telah beroperasi penuh sejak pertengahan tahun 1990-an, dan beberapa fasilitasnya telah dipasang. Teknologi ini paling tepat untuk situasi di mana terdapat tingkat-tingkat pengendalian yang tinggi dan bila pemulihan logam komersial dimungkinkan.

Varian yang lebih baru pada penggunaan secara biogenik menghasilkan hidrogen sulfida untuk pengolahan logam bermuatan air dengan menggunakan unsur sulfur sebagai titik awal dalam generator hidrogen sulfida yang berdiri sendiri (Bratty et al. 2006). Jumlah asam asetat atau sukrosa diperlukan untuk mengurangi sulfur ke sulfida hanya seperempat dari yang dibutuhkan untuk mengurangi sulfat ke sulfida, akan sangat mengurangi biaya operasional dibandingkan dengan menggunakan sulfat sebagai sumber sulfida. Setidaknya lima pabrik pengolahan komersial yang menggunakan teknologi tersebut telah ditugaskan di Amerika Serikat dan Kanada.

Sementara penyingkiran logam dengan endapan logam sulfida seperti ini mungkin merupakan awal proses pengolahan reduksi sulfat yang aktif, atau proses pengurangan, penyingkiran sulfat dengan sendirinya (melalui berbagai macam proses pengolahan) saat ini menjadi fokus di beberapa yurisdiksi di luar negeri. Alasan untuk peningkatan persyaratan ini untuk menurunkan konsentrasi sulfat di dalam air tambang yang dilepaskan meliputi:

- kontribusinya terhadap salinitas dalam air yang dilepaskan ke daerah tangkapan air
- efek racun tidak langsung sebagai akibat pengurangan mikroba dari sulfat menjadi hidrogen sulfida dalam air pori sedimen hilir bermuatan karbon organik yang cukup⁵⁹
- eutrofikasi yang memicu disebabkan oleh keluarnya fosfor dari sedimen dalam menanggapi konversi tahap hidroksida besi (pengikat fosfat yang kuat) ke tahap besi sulfida jauh lebih stabil.

Studi kasus 11 dan 12 memeriksa perlakuan aktif. Studi kasus 11 mendokumentasikan sejarah operasi dari kapur aktif dosis WTP besar yang terpasang di lokasi warisan Mount Morgan di Queensland.⁶⁰ Studi kasus 12 menjelaskan praktik kerja unggulan dunia WTP di Afrika Selatan yang memproduksi volume besar air minum untuk konsumsi kota dari pengolahan DAL yang dihasilkan oleh empat tambang bawah tanah dan tiga tambang terbuka.

⁵⁹ Sementara sulfat per se toksisitas berkadar rendah (ANZECC-ARMCANZ 2000), hidrogen sulfida lebih beracun daripada hidrogen sianida.

⁶⁰ Ini merupakan pembaruan studi kasus dalam edisi terakhir buku ini, mendokumentasikan menjelang pembangunan pabrik.

Studi kasus 11: Perlakuan aktif air pit di lokasi warisan utama sebelum pelepasan air yang diolah ke sungai, lokasi warisan Mount Morgan, Queensland

Konteks

Lokasi tambang warisan Mount Morgan terletak sekitar 40 km barat daya dari Rockhampton di Central Queensland. Tambang tersebut terdiri dari 270 ha lahan yang belum direhabilitasi, termasuk tambang terbuka (open-cut pit (OCP)) yang dilanda banjir besar yang berisi sekitar 9.000 ML air sangat masam dan kaya logam pada tahun 2003. Dengan tidak adanya tumpahan dari OCP, masukan DAL utama ke Dee River yang berdekatan dari lokasi yang diakibatkan oleh limpasan curah hujan dan rembesan lateral. Pada tahun 2003, ditetapkan bahwa tumpahan OCP secara substansial akan meningkatkan muatan tahunan kemasaman dan logam ke Dee River. Diperkirakan ada kemungkinan 50% dari tumpahan yang tidak terkendali dari OCP di tahun-tahun mendatang dengan tidak adanya pengelolaan aktif permukaan air pit. Pengolahan air aktif adalah satu-satunya cara praktis untuk mengurangi kemungkinan tumpahan di masa depan.

Pekerjaan pembangunan mendasari pelaksanaan pengolahan air kapur dosis air OCP disajikan sebagai studi kasus dalam edisi 2007 dari buku ini (DITR 2007). Rincian teknis penuh disediakan dalam Jones et al (2003). Kapur (CaO) adalah penetral yang dipilih karena tinggi ANC-nya, ketersediaan lokal dan efektivitas biaya. Kapur mati (quicklime slaked) menghasilkan kalsium hidroksida (CaOH_2) ditambahkan ke air pit, menaikkan pH untuk target pengolahan 7,5. Menangani air masam dan kaya logam OCP ke standar yang sesuai untuk pelepasan ke Dee River bertujuan menurunkan ketinggian muka air pit dari probabilitas tumpahan 50% (Pra 2006) untuk <1% probabilitas tumpahan untuk setiap tahun tertentu berdasarkan catatan sejarah curah hujan tahunan. Kontaminan logam utama yang ditargetkan untuk disingkirkan adalah aluminium, besi, tembaga, kadmium dan seng.

Keterangan tentang pabrik pengolahan

Pabrik pengolahan dirancang untuk mengobati air pit yang bermuatan kontaminan pada tingkat yang diperlihatkan pada Tabel 1. Sebuah pabrik modus operasi kereta tunggal dibangun awalnya untuk mengobati air pada tingkat 37,5 L/detik dengan kapasitas dibangun untuk memperluas ke kereta kembar modus operasi di masa depan. Pabrik kereta tunggal ditugaskan pada tahun 2006 dengan biaya sebesar \$3,4 juta. Pembaruan selesai pada tahun 2013 mengakibatkan pabrik pengolahan mampu mengobati air OCP pada tingkat maksimal 75 L/detik. Total biaya modal untuk pabrik pengolahan air \$5.710.000, termasuk pembaruan.

Pabrik pengolahan air (Gambar 1) saat ini merupakan operasi yang terus menerus dan otomatis dengan kapasitas lumpur berdensitas tinggi. Pengolahan dengan kapur mati (slaked quicklime) berakibat pengendapan dan penyingkiran >99% dari logam sasaran (Tabel 1). Tingkat konsentrasi residu yang sangat rendah dari tingkat logam dalam air yang diolah jauh lebih rendah daripada di DAL yang dilepaskan ke sungai di lokasi limpasan selama peristiwa hujan, DAL yang melewati sistem rembesan intersepsi atau DAL yang berpotensi pelepasan tidak terkendali selama limpasan pit akibat curah hujan yang ekstrim.



Gambar 1: Pabrik pengolahan air kapur aktif tambang Mount Morgan

Pabrik saat ini pabrik pengolahan mengoperasikan laju rata-rata 65 L/detik pakan (5,6 ML/hari) dari pit dengan hasil 48% (2,3 ML/hari) dari air yang diolah untuk pelepasan. Rata-rata tingkat umpan memerlukan pemeliharaan terjadwal dan penghentian operasional. Lumpur aliran bawah memiliki kepadatan sekitar 3%.

Tabel 1: Kualitas air OCP Mount Morgan Mine—mentah dan telah diolah

	PELEPASAN KE SASARAN SUNGAI ¹ (MG/L) KECUALI DISEBUTKAN	AIR PIT MENTAH		AIR YANG TELAH DIOLAH (65L/S PAKAN PIT MENTAH DAN SATU MODUL PENJELASAN)	
		Pra-2006	Maret 2014	Target desain pabrik pengolahan	2014
Target pelepasan utama					
pH	6,5-8,5	2,68	3,82	7	7,06
TDS	11500	18736	10300	14400	7860
Aluminium ²	1,1	714	1134-1320	0,25	LDL-0,91
Besi ²	Tidak Ada	231	10,4(15,7)	0,04	LDL
Tembaga ²	1	35	66,6(79,3)	0,016	0,02-0,07
Kadmium ²	0,02	0,15	0,25(0,28)	0,016	0,04
Zinc ²	0,16	33,1-72,6	44,3(51,8)	0,04	0,15
Target pelepasan sekunder					
Magnesium	1.500	1290	2350	-	1800
Sulfat	9500	12805	16680	9120	9870
EC (µS/cm)	11000	11703	15209	Tidak Ada	12128
Kalsium	1.000	536	523	-	529

LDL = less than detection limit (kurang dari batas deteksi); N/A = Tidak ada

¹ Target adalah 'target pemacu utama' (target yang diinginkan asal-asalan berdasarkan penilaian risiko toksikologi sungai bawah dan kualitas air untuk pedoman stok).

² Konsentrasi terlarut (<0,45µm), dengan jumlah konsentrasi dalam tanda kurung.

Limbah lumpur (terutama gipsum dan logam hidroksida) menahan lebih dari 99% kontaminan logam yang dipompa balik ke dalam OCP, dengan olahan air supernatan air yang dibuang langsung ke Dee River yang berdekatan.

Kinerja Pabrik Pengolahan

Pada tingkat dosis kapur saat ini, konsentrasi elemen logam kontaminan utama dari Al, Fe, Cu dan Zn berhasil diturunkan ke dalam kisaran target yang diinginkan untuk pelepasan dan pH tersebut berhasil dinetralkan (Tabel 1). Tingkat target yang diinginkan untuk EC, sulfat, kadmium dan magnesium yang bervariasi telah dicapai. Peningkatan tingkat kapur dosis akan diperlukan untuk menaikkan pH lebih lanjut guna mengurangi tingkat pelepasan logam tersebut untuk tingkat target yang diinginkan setiap saat. Namun, biaya penalti yang sangat signifikan dalam penggunaan kapur, ditambah dengan peningkatan produksi lumpur, akan perlu dikeluarkan untuk mencapai hal ini. Otomatisasi pabrik memberikan sinyal waspada untuk pH dan kekeruhan yang akan dikirim melalui SMS ke operator pabrik, yang jarak jauh dapat menginterogasi fungsi kontrol untuk operasi pabrik dan secara manual menyesuaikan penyetelannya jika diperlukan. Jika pH air yang diolah gagal memenuhi target yang diperlukan, pabrik pengolahan akan secara otomatis berhenti bekerja.

Penurunan ketinggian muka air OCP untuk memenuhi target ke depan untuk probabilitas tumpahan (yaitu, kurang dari 1% per tahun) dicapai secara singkat pada tahun 2008. Namun, berikutnya peristiwa curah hujan yang terus menerus yang secara sejarah tinggi, yang berpuncak dengan hujan setelah Siklon Tropis Oswald pada 2013 (setara dengan 1:2.000 tahun peristiwa curah hujan), berada di luar jangkauan yang diperhitungkan dalam pembuatan model neraca air pit asli. Sebelum tahun 2013, menanggapi meningkatnya persediaan air OCP, peningkatan kapasitas pengolahan air diselesaikan pada tahun 2012 dan empat evaporator kabut dengan kapasitas gabungan untuk memproses 1,9 ML air pit harian dipasang dan diimplementasikan. Sayangnya, pada bulan Januari 2013, kapasitas gabungan ini tidak cukup dan arus besar air dari Topan Oswald memuncak dalam pelepasan air OCP yang tidak terkendali ke Dee River.

Kapasitas operasi saat ini untuk pengolahan air OCP dan penguapan dianggap cukup untuk ketinggian muka air pit lebih rendah ke <1% probabilitas tumpahan selama 2-5 tahun ke depan, tergantung pada terjadinya ekstrim peristiwa curah hujan (jauh di atas rata-rata). Fokusnya akan berada di pengelolaan air lokasi dalam menanggapi dampak curah hujan yang ekstrim. Termasuk dalam hal ini pilihan untuk mengalihkan air tawar jauh dari OCP dan meningkatkan kapasitas penyimpanan air tawar darurat di atas OCP.

Kesimpulan

Pabrik pengolahan air di Mount Morgan diinstalasi untuk mengurangi tingkat DAL di OCP guna memastikan freeboard yang cukup untuk mencegah pelepasan yang tidak terkendali ke Dee River yang terjadi dalam menanggapi peristiwa hujan besar. Pabrik ini telah memenuhi tujuan kualitas air untuk pelepasan air olahan ke sungai dan telah beroperasi pada tingkat tinggi dari ketersediaan. Namun, telah ada contoh dari pelepasan DAL yang tidak terkendali dari OCP. Kejadian ini menggambarkan tantangan yang terlibat dalam menentukan ukuran sebuah pabrik pengolahan guna menampung peristiwa cuaca ekstrim yang terjadi segera setelah instalasi pabrik dan sebelum ada cukup waktu untuk penarikan awal yang cukup dari penyimpanan. Hal ini tidak hanya ukuran peristiwa tetapi juga waktu peristiwa yang penting. Kapasitas pengolahan pabrik dua kali lipat pada tahun 2013 untuk mengatasi masalah ini.

REFERENSI

DITR (Department of Industry, Tourism and Resources) (2007). 'Case study: active treatment: Mt Morgan Mine, Qld', in *Managing acid and metalliferous drainage*, Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry, DITR, Canberra.

Jones, DR, Laurencont, T, Unger, C (2003). 'Towards achieving sustainable water management for an acidic open cut pit at Mt Morgan, Qld, pp. 513-519 in Farrell, T, Taylor, G (eds), *Proceedings of the 6th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, Cairns, Australia, 14-17 July 2003, AusIMM Publication Series No. 3/2003.

Studi kasus 12: Perlakuan aktif air tambang untuk digunakan lokasi dan untuk air minum kota, eMalahleni, Afrika Selatan

Konteks

Akses yang dapat diandalkan untuk air, pengelolaan dan pelepasannya merupakan persyaratan mendasar untuk semua operasi Anglo American Coal Afrika Selatan saat ini dan masa depan. Selain itu, terdapat kebutuhan untuk memperlihatkan, dan diakui untuk, pengelolaan air yang bertanggung jawab dan berkelanjutan, baik dalam jangka pendek dan panjang, guna meningkatkan izin sosial perusahaan untuk beroperasi.

Pengelolaan air tidak dapat dibatasi dengan batas-batas dalam tambang, tetapi juga harus mempertimbangkan pemangku kepentingan dan proses yang terjadi di luar, karena ini dapat memiliki implikasi yang signifikan untuk bagaimana bisnis dilakukan dalam kerangka geografis, hukum dan sosial. Strategi air batubara Afrika Selatan didorong oleh:

- komitmennya untuk investasi berkelanjutan dalam pengolahan dan inovasi teknologi
- penggunaan prasarana untuk menguntungkan masyarakat
- memastikan bahwa kualitas dan pasokan tidak terganggu
- mendorong efisiensi untuk meminimalkan jejak perusahaan
- bermitra dengan para pemangku kepentingan guna mencari solusi yang saling menguntungkan untuk tantangan air bersama.

Pekerjaan bawah tanah batubara Afrika Selatan Anglo American terletak di sekitar kotamadya eMalahleni di Mpumalanga Highveld (100 km dari Pretoria) saat ini bermuatan sekitar 100.000 liter air (naik lebih dari 9.000 ML/y) dibandingkan dengan sekitar 104.000 ML di Witbank Dam, sumber utama air minum daerah. Sementara masyarakat setempat menghadapi kekurangan kritis air untuk mendukung pertumbuhan perumahan, komersial dan industri, pertambangan dipengaruhi oleh surplus air yang terkontaminasi dalam pekerjaan bawah tanah.

Proses pengolahan air

Penelitian selama satu dekade dan pengembangan dalam teknologi pengolahan air tambang telah menghasilkan penerapan teknologi desalinasi untuk produksi air minum dari air tambang yang jika tidak demikian dinyatakan tidak dapat digunakan. Secara paralel telah terjadi pengurangan risiko keselamatan antara kerja tambang terhubung dan pencegahan dampak lingkungan yang akan dihasilkan dari pelepasan DAL yang tidak terkendali di permukaan.

Skema Reklamasi Air eMalahleni, ditugaskan pada tahun 2007, merupakan perusahaan patungan antara Anglo Coal South Africa dan BHP Billiton Energy Coal South Africa (BECSA) dan dirancang untuk mengolah air 25–30 ML per hari dari empat operasi Anglo dan air dari dekatnya, tambang mati milik BECSA (lihat Gunther et al. (2006) dan Hutton et al. (2009) untuk rincian proses pengolahan). Gambar 1 memperlihatkan foto udara pabrik dan flowsheet proses diperlihatkan pada Gambar 2. Komposisi pakan dan air yang diolah diringkas dalam Tabel 1.

Manfaat pengolahan air

Anglo Coal menandatangani perjanjian pasokan air curah dengan penekanan air Kotamadya Lokal eMalaheni dan saat ini memasok sekitar 12% dari kebutuhan air minum harian kota melalui penyediaan 16 ML air per hari, penurunan persentase orang-orang tanpa air minum dari 14% hingga 2%. Sejak awal, reklamasi air pabrik eMalaheni (EWRP) telah memproses lebih dari 50 miliar liter air dampak tambang dengan standar air minum dan telah memasok 35 miliar liter untuk kotamadya.

Pengoperasian pabrik juga telah membuat beberapa operasi penambangan di sekitarnya mandiri sehubungan dengan kebutuhan air, sehingga mengurangi tekanan pada sistem pasokan air kota yang sudah dibatasi. Sisa air olahan dilepaskan ke daerah tangkapan air lokal, sehingga mengurangi sebagian dampak pencemaran pada sistem sungai.

Kesimpulan

EWRP merupakan proyek pembangunan berkelanjutan kelas dunia yang telah mengubah kewajiban utama menjadi aset berharga dan menciptakan manfaat yang luas bagi lingkungan, masyarakat setempat, dan tambang batubara pemberi makannya. Proyek ini telah menerima beberapa penghargaan internasional dan merupakan satu-satunya prakarsa pertambangan untuk didukung oleh Konvensi Kerangka Kerja PBB Program Momentum untuk Perubahan tentang Perubahan Iklim (http://unfccc.int/secretariat/momentum_for_change/items/6634.php).

Pada bulan Juli 2011, Anglo Coal menyetujui investasi modal tambahan untuk meningkatkan kapasitas pengolahan berjalan untuk 50 ML sehari, dengan kapasitas puncak 60 ML sehari, guna menangani kebutuhan pengelolaan air kontribusi tambang selama 20–25 tahun sisa kehidupannya. Tahap kedua saat ini sedang dibangun dan diharapkan akan beroperasi sebelum akhir tahun 2015. Perkembangan ini meliputi pembangunan pipa 23-kilometer untuk memenuhi 4,5 juta ton per tahun perusahaan tambang Kromdraai dan kewajiban lingkungan pasca-penutupan. Ekspansi merupakan investasi US \$75 juta, dan jumlah belanja Anglo Amerika pada teknologi pemurnian air tambang di eMalaheni sendiri untuk sekitar US\$140 juta.



Gambar 1: Tahap 1 pabrik reklamasi air

Pengolahan in situ atau 'pada sumber'

Pengolahan in situ atau 'pada sumber' menjadi pilihan yang lebih logis daripada WTP terpusat untuk pengolahan DAL aktif (untuk satu atau beberapa badan air) saat biaya pemompaan dan jaringan pipa air tercemar bagi WTP terpusat melebihi biaya memobilisasi sistem dosing dan netralisasi ke badan air tercemar (Taylor et al. 2005). Pengolahan in situ dilakukan dalam badan air target melalui aplikasi reagen langsung. Oleh karena itu, peralatan pengolahan harus portabel dan mungkin seluler (angka 31 dan 32).

Gambar 31: Sistem portabel pencampuran dan pemberian dosis bertenaga dari generator untuk situs terpencil



Gambar 32: Unit pencampuran dan pemberian dosis bergerak bertenaga solar yang dipasang di truk



Semua proses pengolahan normal (pencampuran, netralisasi, aerasi dan padatan settling) terjadi dalam badan air. Meskipun jauh lebih murah daripada WTP terpusat, pengolahan in situ tidak mendapatkan manfaat dari pengendalian proses pada deretannya. Akibatnya, multiparameter semikontinu pemantauan kualitas air sebelum, selama dan setelah dosing reagen sangat penting untuk pengendalian laju pengolahan dan mencapai kualitas air yang diinginkan. Tanpa adanya pemantauan kualitas air yang akurat dan komprehensif, dapat mengakibatkan underdosing atau overdosing. Namun demikian, dalam metode pengolahan in situ sangat fleksibel, biaya rendah dan mudah dan cepat untuk dilaksanakan, dan biasanya mampu mengolah volume air yang jauh lebih besar waktu per unit dari kemauan WTP tetap, karena dapat membuang 20-50 ton reagen per hari. Mereka sangat tepat untuk mengatasi skenario tergantung peristiwa dan tanggap darurat.

Pengolahan in situ dapat dilakukan di danau pit, kolam dam tailing, kolam air proses, kolam curah hujan, sungai dan anak sungai. Hal ini dapat dilakukan sebagai pengolahan rutin, pengolahan tambahan, pengolahan terus menerus atau pengolahan batch atau sebagai tanggap darurat.

Metode pengolahan air pit in situ dijelaskan dalam Castendyk & Eary (2009), McCullough (2011) dan Geller & Schultze (2013). Perlu berhati-hati dalam perencanaan dan pelaksanaan pengolahan in situ sebagai dinamika pencampuran (dan karenanya efektivitas metode pengolahan) dapat menjadi rumit dalam badan-badan air dalam yang khas tersebut. Terdapat banyak contoh di mana dosing in situ danau pit belum membawa hasil yang diinginkan. Ada beberapa alasan mengapa hal ini mungkin terjadi:

- Operator yang kurang berpengalaman mencoba melakukan tugas-tugas dosing kimia yang rumit tanpa pengetahuan atau pengalaman yang memadai.
- Dalam kasus manipulasi biologi in situ (misalnya, merangsang reduksi sulfat bawah hipolimnion dengan penambahan senyawa organik atau biomassa), interaksi antara dinamika fisik (misalnya, pencampuran musiman) dan proses biologi yang secara intrinsik rumit dan sulit untuk diprediksi.
- Dalam beberapa kasus, awal pengolahan in situ telah berhasil, tapi input berkelanjutan kemasaman ke pit (dari dinding batuan atau dari limpasan atau rembesan dari tempat lain) tidak dicegah, sehingga kualitas air memburuk lagi ke tingkat yang tidak berterima untuk pembentukan fungsi biologis ataupun pelepasan yang dipompa ke daerah tangkapan air permukaan.

Karena itu keberhasilan pengolahan DAL in situ memerlukan pengetahuan khusus tentang perilaku fisik dan kimia dari badan air yang terpapar dampak dan perilaku geokimia bahan yang dilepaskan ke pit, batuan dinding pit dan daerah tangkapan air pit.

7.3.3 Sistem perlakuan pasif

Air permukaan

Ketiga kelas dasar sistem perlakuan pasif untuk air permukaan yang terpapar DAL adalah:

- saluran air kapur oksik dan anoksik atau saluran riffle untuk menetralkan air rendah pH
- netralisasi kimia yang dibantu (penggunaan tenaga surya atau air untuk mendorong sistem penyaluran reagen)
- lahan basah (permukaan dan aliran bawah permukaan melalui substrat bahan organik, dengan atau tanpa tambahan batuan kapur).

Secara historis, penggunaan sistem pasif untuk memproses DAL memiliki keberhasilan campuran, sebagian besar sebagai hasil dari upaya untuk menerapkan teknologi tersebut untuk kemasaman terlalu tinggi dan/atau situasi muatan logam. Namun, jika sistem perlakuan pasif dirancang dan dioperasikan dalam keterbatasan muatan kimia dan fisiknya, mereka dapat memberikan alternatif yang sangat efektif dan pengolahan yang murah. Sementara tidak dapat dianggap sebagai solusi begitu saja, pelaksanaan yang benar akan meminimalkan pemeliharaan dan memaksimalkan masa hidup mereka.

Tahap tunggal sistem perlakuan aktif atau pasif yang hanya menggunakan penetral kimia, mungkin menemui kesulitan dalam memenuhi target yang ketat untuk perlindungan ekosistem perairan, tergantung pada kisaran logam dan zat terlarut lainnya dalam sumber air. Di sinilah tahap kedua sistem gosokan biologis pasif (seperti lahan basah) dapat memberikan keuntungan yang berbeda dengan mencapai kualitas air yang dibutuhkan tanpa modal dan biaya operasi besar untuk teknologi perlakuan aktif sekunder dan tersier.

Namun, lahan basah tidak dapat cepat menyesuaikan diri dengan penurunan mendadak dalam kualitas air atau peningkatan jangka pendek besar dalam laju aliran. Lahan basah bekerja terbaik pada pH lebih besar dari 4,5 pada kondisi mapan/statis, dengan waktu tinggal 10-15 hari. Lahan tersebut membutuhkan tingkat aliran masuk yang relatif konstan dari kolam di mana air tambang awalnya dikumpulkan (dan pra-dinetralkan, jika perlu) dan harus dilindungi dari peristiwa badai dengan menggunakan sistem pengalihan split-weir untuk mengalihkan aliran yang lebih tinggi, lebih encer mengalir ke alur aliran daerah tangkapan air.

Umur desain sistem perlakuan pasif merupakan masalah utama. Dalam beberapa kasus, air tambang bervolume signifikan yang memerlukan pengolahan hanya dapat dihasilkan selama tahap operasi, sebelum rehabilitasi bahan sumber (seperti tumpukan batuan sisa) atau penghentian pengeringan. Dalam kasus tersebut, jelas ada sedikit penekanan pada keberlanjutan jangka panjang (pasca-penutupan). Kebutuhan untuk sistem mandiri menjadi lebih amat penting setelah dekomisioning lokasi. Sistem perlakuan pasif mengakumulasi racun logam/metaloid, dan implikasi jangka panjang yang dihasilkan untuk perencanaan penutupan harus diatasi saat jenis sistem tersebut telah diperhitungkan.

Rincian lebih lanjut tentang desain dan penerapan sistem lahan basah untuk pengolahan DAL dalam pedoman yang dikeluarkan oleh Kantor AS Pertambangan Reklamasi Permukaan dan Penegakan (US Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement (OSMRE))⁶¹ dan oleh konsorsium Piramid (2003).⁶²

Air tanah—permeabel penghalang reaktif dan redaman alam

Penghalang reaktif permeable

Mengingat kesulitan yang berhubungan dengan pendekatan pompa-dan-proses tradisional untuk remediasi air tanah terkontaminasi—terutama untuk akuifer pembentukan baru batuan retak hasil rendah dari pasif dalam metode pengolahan in situ telah dikembangkan, diuji dan diimplementasikan pada skala penuh selama 20 terakhir tahun (Vidic 2001; Wright & Conca 2006; Naidu & Birke 2014). Proses pengolahan mungkin melibatkan proses abiotik dan biologi yang bekerja secara individu atau dalam kombinasi sinergis. Sistem pasif disebut 'penghalang reaktif yang permeabel' (permeable reactive barriers (PRB)), karena air tanah diproses saat melewati zona reaktif. Sistem 'penghalang' ini ke zat terlarut target dan tidak ke aliran air.

Untuk aplikasi pengolahan AMD, kadar teknologi ini terdiri dari penghalang di mana:

- sulfat dikurangi menjadi sulfida dan logam yang diendapkan sebagai sulfida yang tidak larut (karena penghalang terletak di bawah lapisan air tanah, terdapat risiko minimal reoksidasi masa depan sulfida logam yang diendapkan)
- logam diendapkan sebagai bentuk tak larut (misalnya, menggunakan hancuran apatit untuk mengendapkan fosfat logam)
- ion-ion anorganik (misalnya, Cr (VI), Se (IV), U(VI)) dikurangi hingga ke bentuk-bentuk yang tak larut.
- nitrat (dari residu peledakan) yang terdegradasi oleh proses-proses mikroba atau anorganik (misalnya, pengurangan oleh logam besi).

Partikel-partikel besi yang dibagi lembut (disebut besi nol-valent, ZVI), sering dikombinasikan dengan substrat 'spacer' kaya organik, semakin menjadi bahan pilihan untuk digunakan dalam PRB untuk pengolahan air yang bermuatan berbagai macam logam redoks-sensitif dan metaloid, seperti Co, Cr, Cu, Ni, As dan Se, asalkan pH tidak masam. Yang penting, semua logam ini dapat larut pada pH khas NMD dan tidak mudah disingkirkan untuk tingkat yang berterima lingkungan dengan metode pengolahan konvensional yang murah. Dalam kasus gumpalan asam, penetral (misalnya, hanya batuan kapur berbutir halus atau dalam kombinasi dengan bahan organik untuk mendorong pengurangan sulfat) perlu ditambahkan dalam kombinasi dengan besi.

PRB dapat digunakan untuk memproses sumber DAL yang ada di tanah atau dapat dipasang sebagai penghalang sentinel yang menyediakan cadangan jangka panjang untuk pengendalian utama DAL asalkan dengan rekayasa pembendungan (seperti lapisan penutup dan/atau kombinasi lapisan) untuk limbah sulfida. PRB telah diterapkan untuk gumpalan yang berasal dari WRD maupun bendungan tailing.

61 <http://amd.osmre.gov/>.

62 <http://www.imwa.info/piramid/files/PIRAMIDGuidelinesv10.pdf>.

PRB tunduk pada keterbatasan yang mirip dengan yang berlaku untuk sistem perlakuan pasif untuk air permukaan; yaitu, yang paling tepat untuk kemasaman dan logam muatan yang relatif rendah tapi aplikasi yang tahan lama, seperti lereng menurun yang menghalangi gumpalan yang tersebar luas.

Seperti untuk semua jenis sistem pengolahan, umur panjang dari PRB tergantung pada pemuatan zat terlarut dan kemasaman dalam gumpalan-gumpalan yang sedang diproses relatif terhadap pengolahan jumlah substrat yang awalnya telah dipasang di PRB. Mungkin perlu untuk menggali dan mengisi substrat pengolahan jika biaya awal semakin menipis, seperti diungkapkan oleh pemantauan kinerja gradien turun, sebelum tujuan pengolahan utama dapat dipenuhi.

Redaman alam

Potensi redaman alam dapat digunakan, di mana berlaku, untuk mengendalikan kontaminasi air tanah oleh rembesan DAL ke bawah. Ini bergantung pada aksi adsorpsi alam dan curah hujan untuk menghilangkan sebagian zat terlarut dari air tanah (tetapi kurang efektif untuk kebanyakan ion-ion utama—kalsium, magnesium dan sulfat) sebelum penerima air (pengguna air tanah, ekosistem yang bergantung pada air tanah) terkena dampak.

Misalnya, pelemahan alam dapat dianggap di mana WRD dicirikan oleh horizon tebal batuan yang bermuatan karbonat dengan kapasitas penetral yang cukup untuk memperhitungkan muatan keasaman yang akan diproduksi dalam jangka panjang oleh oksidasi limbah sulfida di tempat pembuangan limbah. Lapisan karbonat akan efektif menjadi PRB horizontal. Proses pelemahan alam ini akan menjadi tambahan untuk fungsi sistem lapisan penutup yang dipasang untuk mengurangi infiltrasi dan/atau masuknya oksigen.

Memanfaatkan kemungkinan yang diberikan oleh redaman alam bukanlah pilihan manajemen untuk 'tidak melakukan apa-apa', tapi bergantung pada bukti yang kuat dari investigasi lapangan, pemodelan dan pemantauan yang disediakan bagi regulator untuk memperlihatkan bahwa proses penyingkiran diprediksi sedang berlangsung dan bahwa akan ada risiko yang rendah (berterima) dari dampak negatif terhadap lingkungan penerima. EPA Amerika Serikat dan otorita negara Amerika Serikat telah mengeluarkan pedoman untuk penggunaan redaman alami untuk mengelola logam dan radionuklida dalam air tanah, dan pedoman tersebut harus digunakan sebagai acuan oleh mereka yang sedang mempertimbangkan potensi penerapannya.⁶³

Dalam konteks Australia, redaman alam, dengan netralisasi dengan mendasari lapisan tebal kapur Andamooka resapan lindi asam ke bawah dari bendungan tailing di Olympic Dam, telah diterima menjadi proses yang efektif (Pemerintah Negara Bagian South Australia 2011).

Danau-danau pit

Pengalaman internasional dengan penerapan perlakuan pasif kualitas air pit oleh proses mikrobiologis telah bercampur (Geller & Schultz 2013).

Meskipun janji yang cukup besar yang telah diperlihatkan oleh kerja berskala lapangan sampai saat ini, masih banyak yang harus dilakukan untuk mengembangkan pemahaman teknis yang diperlukan sehingga metodologi yang diusulkan dapat diandalkan guna pemeliharaan jangka panjang kualitas air untuk danau pit tertentu. Ada beberapa contoh di mana upaya untuk menciptakan sistem bertingkat yang stabil dengan komposisi hipolimnion anoksik yang tepat belum berhasil seperti yang diharapkan (Fisher & Lawrence 2006; Taman et al 2006), yang memerlukan tindakan perbaikan berikutnya.

63 <http://www.itrcweb.org/Guidance/GetDocument?documentID=5>.

Secara khusus, gas hidrogen sulfida berlebih telah dihasilkan di hipolimnion anoksik yang diproduksi dengan menambahkan bahan organik (seperti di Island Copper di British Columbia; Wilton & Lawrence 1998) atau merangsang produktivitas biologis dengan menambahkan nutrisi. Masalah ini dapat terjadi pada sistem di mana terdapat kelebihan sulfat relatif larut terhadap larutan logam (Fe, Cu, Zn) untuk pengendapan sebagai sulfida logam, dan karenanya dapat menghasilkan kelebihan gas H₂S bebas. Karena oksidasi pirit umumnya melibatkan pemisahan fisik besi awal dari drainase dengan pengendapan besi hidroksida, adalah umum untuk memiliki kelebihan stoikiometrik relatif sulfat pada besi yang signifikan di DAL.

Setidaknya, perlakuan pasif danau pit yang dibangun harus dilihat sebagai strategi jangka sangat panjang yang akan membutuhkan investasi substansial berkelanjutan dalam pemantauan dan penelitian.

8.0 KERANGKA KERJA REGULASI UNTUK MENILAI DAN MENGELOLA DAL

Pesan-pesan kunci

- Kepatuhan dasar pada undang-undang merupakan standar minimum yang harus dicapai saat mengelola dampak lingkungan dari kegiatan pertambangan. Praktik kerja unggulan melampaui standar minimum tersebut.
- Praktik kerja unggulan mengakui bahwa terdapat kewajiban terhadap pemangku kepentingan dan tuntutan UU yang ketat.
- Bagi perusahaan pertambangan Australia yang beroperasi di luar negeri mungkin perlu mempertimbangkan pedoman internasional untuk kasus-kasus di mana undang-undang nasional tidak memberikan pedoman khusus untuk praktik pertambangan, atau di mana persyaratan yang ada tidak memenuhi standar kontemporer atau standard praktik internal perusahaan.

8.1 Pendahuluan

Pemerintah Australia maupun Pemerintah Negara Bagian dan Pemerintah Teritori memiliki tanggung jawab guna melindungi kesehatan manusia dan lingkungan terhadap dampak berbahaya dari pertambangan, termasuk dengan mengurangi potensi dampak negatif DAL. Tanggung jawab tersebut dimulai selama tahap eksplorasi proyek pertambangan dan biasanya berlangsung lama setelah penutupan tambang.

Untuk melaksanakan tanggung jawab mereka, yurisdiksi Australia telah memberlakukan undang-undang untuk penilaian dan pengelolaan pertambangan. Sejalan dengan hukum lingkungan internasional, prinsip-prinsip utama yang mendasari undang-undang secara umum meliputi aspek-aspek berikut:

- *Prinsip pencegahan*. Di mana ada ancaman bahaya lingkungan yang serius atau tidak dapat diperbaiki, kurangnya kepastian ilmiah penuh tidak boleh digunakan sebagai alasan untuk menyetujui suatu kegiatan atau untuk menunda pelaksanaan tindakan pengendalian.
- *Prinsip Keadilan Antargenerasi (Principle of Intergenerational Equity)*. Generasi saat ini harus memastikan bahwa kesehatan, keragaman dan produktivitas lingkungan dilindungi dan akan berkelanjutan untuk kepentingan generasi mendatang.
- *Mekanisme peningkatan penilaian, penentuan harga dan insentif serta Prinsip Pencemar Membayar (Improved valuation, pricing and incentive mechanisms and the Polluter Pays Principle)*. Pertimbangan lingkungan, ekonomi dan keadilan sosial, semuanya harus dijadikan faktor dalam keputusan yang dibuat pada kegiatan yang berpotensi pencemaran seperti pertambangan. Biaya penuh untuk mencegah atau meremediasi polusi yang terkait dengan aktivitas tersebut umumnya harus ditanggung oleh pencemar.
- *Partisipasi masyarakat dalam pengambilan keputusan (Public participation in decision-making)*. Anggota masyarakat (termasuk masyarakat adat) harus dapat berpartisipasi dalam proses pengambilan keputusan lingkungan pemerintah.

Bagian ini menggambarkan bagaimana undang-undang dan instrumen hukum biasanya digunakan untuk pemrakarsa (proponent) langsung guna menilai dan mengelola dampak DAL di Australia, dan meneliti peran yang berbeda dari pemerintah Negara Bagian, Teritori dan Negara Australia dalam mengatur pengelolaan DAL. Persyaratan khusus yurisdiksi harus ditentukan lewat dialog dengan otorita terkait.

8.2 Peran Pemerintah Negara Bagian dan Pemerintah Teritori

Meskipun tata kelola (administrasi) undang-undang perlindungan lingkungan di Australia difasilitasi melalui sejumlah perjanjian bilateral dengan Pemerintah Australia, pada praktiknya banyak pekerjaan tata kelola untuk menilai dan mengelola proyek pertambangan dan dampak lingkungannya dilakukan oleh Pemerintah Negara Bagian dan Pemerintah Teritori.

Berdasarkan hukum Australia, kepemilikan mineral dalam setiap Negara Bagian atau Teritori dipegang oleh Negara Bagian tersebut, dan kewenangan ekstraksi mineral di bawah ketentuan undang-undang pertambangan tertentu yang berlaku dalam yurisdiksi tersebut. Konsekuensinya, instansi pemerintah di setiap Negara Bagian atau Teritori memiliki tanggung jawab untuk memastikan bahwa eksplorasi mineral, pertambangan dan penutupan tambang berlangsung sesuai dengan undang-undang perlindungan lingkungan yang relevan. Rincian undang-undang lingkungan yang berlaku untuk tambang bervariasi antara yurisdiksi yang satu dengan yurisdiksi yang lain (seperti melakukan pengaturan administratif antara instansi pemerintah dalam yurisdiksi), tapi undang-undang umumnya menggunakan instrumen hukum berikut untuk memastikan bahwa risiko DAL dikelola secara memadai:

- *Dampak penilaian/pernyataan lingkungan (Environmental impact assessment/statement (EIA/EIS))*. Ini adalah prosedur interdisipliner dan multi langkah guna memastikan bahwa semua permasalahan lingkungan potensial yang terkait dengan proyek pertambangan dinilai secara memadai dan tanggapan manajemen yang tepat diidentifikasi sebelum operasi proyek disetujui dan dimulai. AMDAL dan EIS biasanya memiliki cukup banyak keterlibatan masyarakat dan membentuk banyak dasar 'izin sosial untuk beroperasi' yang diperlukan sebelum operasi dapat dilanjutkan. Sebagai bagian dari proses AMDAL, pemrakarsa umumnya diperlukan untuk melakukan sampling dan uji kerja geokimia yang memadai untuk menentukan apakah terdapat risiko pertambangan yang signifikan yang akan menyebabkan DAL. Jika DAL diidentifikasi sebagai risiko yang signifikan, pendukung juga diperlukan untuk memperlihatkan bagaimana risiko DAL akan dikelola selama operasi dan setelah penutupan jika proyek pertambangan akan berlanjut.
- *Perizinan pembangunan prasarana lokasi pertambangan (Mine site infrastructure construction approvals)*. Para pemrakarsa mungkin memerlukan perizinan geoteknik dan lingkungan dari pemerintah untuk pembangunan prasarana seperti penyimpanan air, TSF dan fasilitas batuan sisa. Sebagai bagian dari proses perizinan, mereka biasanya perlu memperlihatkan bagaimana bahan PAF dapat dipisahkan dari bahan limbah lainnya dan dikelola dengan cara yang akan mencegah pembentukan masa depan DAL.
- *Perizinan pelepasan lingkungan dan pengeringan (Environmental discharge and dewatering approvals)*. Pemrakarsa mungkin memerlukan perizinan lingkungan untuk operasi TSF dan kolam pengelolaan air limbah. Izin-izin mungkin juga diperlukan untuk pengeringan pit tambang atau pekerjaan bawah tanah serta untuk membuang limbah pengeringan ke lingkungan. Sebagai bagian dari persyaratan perizinan untuk mengelola sistem ini, para pemrakarsa mungkin diminta untuk melakukan pemantauan kualitas air yang sedang berlangsung guna memperlihatkan tanah yang belum terkontaminasi oleh rembesan dari TSF atau fasilitas limbah lainnya. Jika muatan kimia memperlihatkan terdeteksinya DAL dalam air tanah dekat TSF atau prasarana pengelolaan air limbah lainnya, para pemrakarsa biasanya diminta untuk menginformasikan kepada instansi pemerintah yang terkait dan untuk menempatkan tindakan-tindakan guna menyelidiki penyebab rembesan dan memastikan bahwa hal itu tidak akan membuat dampak lingkungan yang merugikan.
- *Rencana penutupan tambang (Mine closure plans)*. Para pemrakarsa mungkin diperlukan untuk mulai mengembangkan rencana penutupan tambang segera setelah (atau, di Western Australia, sebelum) tambang menerima izin lingkungan. Dalam rangka mengembangkan rencana tersebut, pendukung umumnya membutuhkan informasi tentang perilaku geokimia jangka panjang dari bahan limbah. Ini biasanya membutuhkan uji kerja geokimia yang luas (terutama pengujian kinetik berdurasi lama) dan pemodelan geokimia. Rencana penutupan tambang dimaksudkan untuk menjadi dokumen hidup yang berubah dan menjadi semakin lebih rinci, lebih banyak belajar tentang geologi dan geokimia dari lokasi tambang. Ini berarti bahwa pengujian geokimia tentang muka yang terpapar (seperti dinding pit), limbah tambang dan residu proses harus terus dilakukan selama hidup tambang guna memastikan agar informasi yang memadai tersedia

untuk menginformasikan manajemen operasional limbah yang sedang berlangsung maupun versi final dari rencana penutupan sebelum penambangan berhenti.

- *Penyediaan keuangan untuk penutupan (Financial provisioning for closure)*. Jaminan keuangan mungkin diperlukan untuk diajukan oleh pemrakarsa sebelum dimulainya operasi. Kuantum dana jaminan umumnya dihitung berdasarkan kewajiban yang diciptakan oleh operasi pertambangan dan tingkat risiko dan mitigasi terkait yang diperlukan, dan mungkin juga mencakup kontingensi. Dalam beberapa yurisdiksi, jaminan keuangan yang masih harus dibayar (accrued) melalui sumber retribusi yang dikenakan pada industri secara keseluruhan.
- *Pelaporan dan pengelolaan lokasi-lokasi terkontaminasi (Contaminated sites reporting and management)*. Di mana pemantauan telah memperlihatkan bahwa air tanah atau limpasan air permukaan dari lokasi tambang telah memperlihatkan bukti kontaminasi karena DAL, pemrakarsa umumnya diminta untuk melaporkan masalah tersebut sesuai dengan ketentuan undang-undang lokasi yang terkontaminasi yang berlaku di wilayah yurisdiksi. Sebagai bagian dari persyaratan pelaporan, mereka biasanya diminta untuk menentukan sumber, luas dan keparahan kontaminasi dan sejauh mana lingkungan telah atau mungkin akan terpengaruh olehnya. Tergantung pada tingkat risiko lingkungan yang ditimbulkan, pemrakarsa kemudian biasanya diminta untuk mengambil tindakan-tindakan untuk mengurangi dampak lingkungan.

8.3 Peran Pemerintah Australia

Pemerintah Australia memiliki peran penting dalam memastikan bahwa pengaturan kegiatan pertambangan oleh masing-masing Negara Bagian atau Teritori dilakukan secara konsisten sesuai dengan pedoman dan prinsip-prinsip yang diakui secara nasional yang memenuhi kewajiban Australia di bawah perjanjian internasional.

Bagian utama dari undang-undang Pemerintah Australia yang digunakan untuk menilai proyek pertambangan ialah *UU Perlindungan Lingkungan dan Cagar Alam Keanekaragaman Hayati th.1999 (Environment Protection and Biodiversity Conservation Act 1999 (EPBC Act))*. Menurut Undang-Undang tersebut, Pemerintah Federal dapat memerlukan AMDAL yang akan dilakukan di mana terdapat proyek pertambangan berpotensi dampak pada satu atau lebih dari sembilan hal penting lingkungan nasional. Satu-satunya sumber daya mineral yang secara khusus tercantum untuk penilaian otomatis penuh di bawah Undang-Undang EPBC adalah uranium. UU itu diperbaiki pada tahun 2013, membuat sumber daya air soal yang signifikan bagi lingkungan nasional dalam kaitannya dengan gas lapisan batubara dan operasi pertambangan batubara besar. Hal ini memiliki relevansi langsung bagi keterlibatan Pemerintah Australia dalam menilai potensi DAL di tambang-tambang batubara sebagai bagian dari proses izin proyek.

Pemerintah Australia memiliki peran tertentu dalam tata kelola *Tanah Hak Aborigin (Northern Territory) UU tahun 1976* dan dalam hal menentukan hak kepemilikan tanah adat. Kedua masalah ini berpotensi dapat mempengaruhi identifikasi kelompok yang perlu berkonsultasi saat menentukan nilai-nilai lingkungan yang mendukung penilaian risiko DAL yang dilakukan oleh para pemrakarsa.

Dengan mengeluarkan pedoman untuk kualitas air dan pencemaran tanah, Pemerintah Australia juga memiliki peran penting dalam menjaga pendekatan nasional yang konsisten guna menilai dan mengelola kontaminasi yang diakibatkan oleh DAL. Pedoman tersebut diterapkan di semua Negara Bagian dan Teritori.

Pedoman kualitas air Australia (ANZECC-ARMCANZ 2000a, b, c) dapat dikatakan instrumen yang paling penting guna menilai risiko yang ditimbulkan oleh dampak DAL pada lingkungan air. Penggunaan kerangka pedoman untuk mengidentifikasi nilai-nilai lingkungan dan untuk menetapkan nilai-nilai pedoman kualitas air sebagai dasar untuk menilai risiko yang ditimbulkan oleh DAL dijelaskan secara rinci dalam Bagian 5.3.

Dewan Perlindungan Lingkungan Nasional didirikan berdasarkan *Undang-Undang Dewan Perlindungan Lingkungan Nasional tahun 1994 (National Environment Protection Council Act 1994)* untuk menjaga pendekatan yang konsisten guna mengelola permasalahan lingkungan dengan mengembangkan Tindakan Perlindungan Lingkungan Nasional (NEPM). NEPM terutama untuk menilai, mengelola dan melaporkan permasalahan lingkungan yang terkait dengan DAL adalah Penilaian Lokasi Kontaminasi dan Inventarisasi Nasional Polutan NEPM.

Tindakan Perlindungan Lingkungan Nasional (Penilaian Lokasi Kontaminasi) didirikan untuk mengembangkan pendekatan yang konsisten untuk menangani kontaminasi lokasi melalui pengembangan pedoman teknis dan kebijakan yang dilaksanakan melalui undang-undang di setiap Negara Bagian dan Teritori.⁶⁴ Baru-baru ini NEPM diperbarui dan kini bermuatan pedoman yang diperluas tentang bagaimana melakukan penilaian risiko yang mencakup tanggung jawab bioavailabilitas logam di tanah yang terkontaminasi oleh limbah pertambangan atau DAL.

Demikian juga, Tindakan Perlindungan Lingkungan Nasional (National Pollutant Inventori) dikembangkan untuk mengumpulkan informasi tentang emisi dan potensial perpindahan polutan dan menyebarkan informasi dalam bentuk yang mudah dimengerti untuk berbagai pemangku kepentingan.⁶⁵

8.4 Dampak kumulatif DAL

Meskipun tindakan peraturan saat ini untuk mengelola dampak kumulatif pertambangan di Australia tidak secara spesifik membahas DAL, para regulator menjadi semakin khawatir tentang efek kumulatif dari penggunaan lahan seperti pertambangan pada lingkungan penerima yang sensitif. Misalnya, EPA Western Australia mengeluarkan sebuah makalah posisi pada tahun 2014 guna memberikan saran strategis bagi pemerintah tentang dampak kumulatif dari pembangunan pertambangan di wilayah Pilbara (EPA WA 2014). Demikian pula, revisi terakhir pada Undang-Undang EPBC memerlukan pemrakarsa dan regulator untuk mempertimbangkan dampak kumulatif dari tambang-tambang batubara dan ekstraksi gas lapisan batubara pada sumber daya air.

Pusat Tanggung Jawab Sosial pada Pertambangan di University of Queensland telah menghasilkan pedoman untuk mengatasi dampak kumulatif dari pertambangan batubara untuk memenuhi persyaratan perundang-undangan Negara Bagian dan Federal (Frank et al. 2010). Konsep-konsep dalam dokumen tersebut dapat langsung diterapkan pada bentuk lain pertambangan. Kerangka kerja berbagai penggunaan lahan (SCER 2013) telah dirancang untuk membantu dalam mengidentifikasi dan menyelesaikan dampak kumulatif dari tambang dalam konteks penggunaan lahan lainnya di daerah pertambangan.

Implikasi utama peraturan tersebut adalah bahwa kriteria lingkungan diamanatkan untuk menilai lokasi tambang baru, mungkin di masa depan bervariasi secara spasial dalam daerah tangkapan air maupun dari waktu ke waktu di mana penggunaan lahan (termasuk tambang) melepaskan ke lingkungan.

8.5 Non-statutory considerations for mining operators

Konsep 'izin sosial untuk beroperasi' pertama kali dikembangkan oleh industri pertambangan di Kanada saat industri mengakui bahwa masyarakat yang cenderung terkena dampak kegiatan pertambangan memiliki hak untuk terlibat dalam keputusan tentang bagaimana tambang akan dikembangkan dan dikelola. Dari perspektif bisnis murni, ditemukan juga bahwa perusahaan tambang yang mendorong partisipasi masyarakat dalam pengambilan keputusan biasanya kurang dihadang oleh oposisi dalam membuka dan mengoperasikan tambang baru serta kurangnya rintangan administrasi dari perusahaan yang memungkinkan partisipasi masyarakat yang lebih terbatas.

Lebih penting lagi, juga menjadi semakin jelas bahwa perusahaan tambang yang membuat komitmen jangka panjang untuk menjadi bagian dari komunitas lokal (misalnya, untuk melibatkan masyarakat yang terpapar dampak dalam perencanaan dan pengambilan keputusan) umumnya mengalami kurang oposisi daripada perusahaan yang tidak membuat komitmen seperti itu. Masyarakat umumnya menilai bagaimana perusahaan telah melakukan yang sesuai dengan izin sosialnya, sampai ke tingkat dan sifat komunikasi dengan mereka (misalnya, apakah komunikasi transparan?), sejauh mana pekerjaan telah sesuai dengan praktik unggulan, dan sejauh mana telah membuat janji-janji dan memenuhi komitmennya.

64 Informasi lebih lanjut tentang NEPM ini tersedia di situs web SKEW, <http://www.scew.gov.au/nepms/assessment-site-contamination>.

65 Informasi lebih lanjut tersedia di lokasi NPI, <http://www.npi.gov.au/>.

Sebagian besar faktor-faktor tersebut juga merupakan persyaratan perundang-undangan untuk pengaturan lokasi tambang di Australia. Namun, operator tambang harus melihat kepatuhan dasar dengan undang-undang sebagai standar minimum yang harus dicapai saat mengelola dampak lingkungan dari kegiatan pertambangan. Praktik kerja unggulan mengakui bahwa terdapat tanggung jawab terhadap pemangku kepentingan dan tuntutan UU yang ketat.

8.6 Lokasi-lokasi tambang yang terbengkalai atau warisan

Sebuah kerangka kerja strategis untuk mengelola tambang yang terbengkalai telah dikembangkan untuk Australia (MCMPPR–MCA 2010). Kerangka kerja tersebut mendorong yurisdiksi untuk mengelola warisan pertambangan secara strategis dan menerapkan pendekatan umum untuk:

- pengelolaan persediaan lokasi dan data lokasi
- peningkatan pemahaman kewajiban dan risiko yang berkaitan dengan tambang yang terbengkalai
- peningkatan pelaporan kinerja
- standarisasi proses dan metodologi
- berbagi pengetahuan dan keterampilan di seluruh wilayah hukum.

Namun, UU EPBC Pemerintah Australia maupun Teritori atau undang-undang perlindungan lingkungan Teritori maupun Negara Bagian tidak secara khusus membahas dampak lingkungan tambang yang terbengkalai yang banyak di antaranya memiliki masalah DAL. Dengan tidak adanya undang-undang untuk tambang yang terbengkalai, ambiguitas tentang tanggung jawab, standar dan proses untuk mencapai rehabilitasi yang memadai dari lokasi tersebut tetap ada. Setiap lokasi yang terbengkalai biasanya ditangani berdasarkan kasus per kasus.

Namun, praktik kerja unggulan sedang diperlihatkan oleh aspek-aspek program tambang yang terbengkalai/warisan di Negara Bagian dan Teritori.

Inventori rinci tentang tambang yang terbengkalai di Western Australia dikeluarkan pada tahun 2002 guna membantu secara langsung mengurangi dampak kesehatan dan keselamatan manusia dari lokasi tersebut dan guna memberikan dasar untuk perencanaan perbaikan. Di yurisdiksi lain, jumlah data di lokasi warisan lebih variabel, seperti informasi yang telah diambil dari database pertambangan yang ada.

Sejak tahun 2010, Departemen Pertambangan dan Perminyakan Western Australia dan Kewenangan Perlindungan Lingkungan (Western Australian Department of Mines and Petroleum and Environmental Protection Authority) telah melaksanakan reformasi yang signifikan terhadap kerangka regulasi dan kebijakan yang berkaitan dengan penutupan tambang di Negara Bagian tersebut (DMP–EPA 2015), termasuk penyusunan kebijakan untuk mengelola dan merehabilitasi lokasi tambang setelah tambang-tambang tersebut terbengkalai. Rehabilitasi tambang yang terbengkalai diaktifkan melalui Dana Rehabilitasi Pertambangan, yang merupakan dana yang dikumpulkan dan disumbangkan oleh operator pertambangan Western Australia. *UU Negara Bagian Dana Rehabilitasi Pertambangan tahun 2012 (Mining Rehabilitation Fund Act 2012)* menyediakan kerangka kerja untuk dana tersebut.

Semua pemegang hak sewa guna yang beroperasi di bawah *UU Pertambangan Western Australia 1978* (dengan pengecualian dari tanah-tanah sewa yang tercakup oleh perjanjian negara yang tidak tercantum dalam peraturan tersebut) diharuskan melaporkan data gangguan dan berkontribusi untuk dana setiap tahun. Uang pada dana yang tersedia untuk merehabilitasi tambang yang terbengkalai di seluruh Negara Bagian di mana pemegang hak sewa/operator gagal memenuhi kewajiban rehabilitasi dan segala upaya lainnya telah digunakan untuk memulihkan dana dari operator. Untuk tambang warisan yang terbengkalai, rehabilitasi terjadi dengan menggunakan bunga yang diperoleh dari kontribusi dana.

Pendekatan berbasis retribusi yang serupa telah dilaksanakan di Northern Territory. Pada bulan Oktober 2013 *UU Manajemen Pertambangan (Mining Management Act)* Northern Territory diperbaiki untuk mewajibkan operator untuk membayar tunai pungutan tahunan sebesar 1% dari security bond (obligasi keamanan) mereka. Untuk mengimbangi dampak dari retribusi operator ini, jumlah security bond yang diperlukan yang akan ditentukan berkurang sebesar 10%. Tujuan dari retribusi ditetapkan oleh UU sebagai 'untuk tata kelola yang efektif UU ini dalam kaitannya dengan meminimalkan atau meluruskan kerusakan lingkungan yang disebabkan oleh kegiatan pertambangan.'⁶⁶

Perubahan tersebut membutuhkan retribusi sebesar 1% dari total terhitung biaya rehabilitasi yang diterapkan untuk setiap operasi pertambangan resmi di bawah UU Pengelolaan Pertambangan untuk semua tambang baru. Tidak seperti tambang di Western Australia, semua tambang di Northern Territory juga wajib memiliki obligasi sebesar 100% untuk penutupan tambang (berdasarkan biaya pihak ketiga), dan berkontribusi retribusi Dana Rehabilitasi Pertambangan yang tidak dapat dikembalikan (non-refundable). Sebagai perhitungan keamanan untuk obligasi mencakup komponen kontingensi 15%, diskon 10% berarti bahwa persyaratan untuk keamanan 100% tetap berlaku.

Awal perolehan dari Dana Rehabilitasi Pertambangan telah digunakan untuk membuat Unit Tambang Warisan (Woollard 2014), yang bekerja menuju pendekatan seluruh-yurisdiksi untuk mengidentifikasi, memprioritaskan dan mengelola remediasi tambang warisan di Northern Territory.

Di New South Wales, Auditor-General telah merekomendasikan agar tujuh besar lokasi tambang warisan DAL (Conrad, Woods Reef, Captains Flat, Sunny Corner, Ottery, Cowarra Gold dan SCA Cobar) harus diberi tahukan kepada Kewenangan Perlindungan Lingkungan negara bagian oleh Departemen Perdagangan dan Investasi, Prasarana dan Jasa Daerah di bawah bagian 60 dari *Undang-Undang Pengelolaan Tanah yang Tercemar tahun 1997 (Contaminated Land Management Act 1997)*. Auditor-General mencatat bahwa saat ini beberapa tambang yang terbengkalai mungkin belum memiliki kerangka kerja legislatif yang relevan untuk manajemen (NSW Auditor-General 2014).

Pemerintah Australia telah menyediakan dana untuk rehabilitasi lokasi tambang uranium warisan yang terbengkalai di tanah Aborigin di Northern Territory. Pekerjaan yang saat ini yang paling relevan dengan buku pedoman ini adalah pengembangan strategi rehabilitasi bagi warisan DAL di bekas lokasi tambang uranium Rum Jungle (NTDME 2013). Kegiatan ini sedang dilakukan di bawah persyaratan perjanjian kemitraan nasional antar pemerintah Northern Territory Australia.⁶⁷

8.7 Operasi pertambangan internasional

Perusahaan pertambangan Australia yang beroperasi di luar negeri minimal harus patuh terhadap undang-undang negara tuan rumah. Namun, juga mungkin perlu mempertimbangkan pedoman internasional seperti yang dikeluarkan oleh Bank Dunia dan Organisasi Kesehatan Dunia jika undang-undang nasional tidak menyediakan pedoman kualitas air khusus untuk operasi pertambangan atau jika persyaratan yang ada tidak memenuhi standar perusahaan kontemporer atau praktik internal.

66 http://www.nt.gov.au/d/Minerals_Energy/index.cfm?newscat1=&newscat2=Indigenous%20Engagement%20Unit&header=Amendments%20to%20the%20Mining%20Management%20Act.

67 <http://www.nt.gov.au/d/rumjungle/>; lihat kasus studi Rum Jungle dalam Bagian 6 buku pegangan ini.

Korporasi Keuangan Internasional (International Finance Corporation (IFC)) Bank Dunia telah mengembangkan pedoman lingkungan, kesehatan dan keselamatan untuk pertambangan yang relevan dengan kualitas air yang terkait dengan DAL (IFC 2007). Khususnya, pedoman menyatakan:

Pengelolaan bahan pembentuk berpotensi asam, DAL dan logam yang bermuatan lindi harus diperpanjang selama ada kebutuhan guna mempertahankan kualitas limbah ke tingkat yang dibutuhkan untuk melindungi lingkungan lokal, termasuk jika perlu, ke dalam tahap dekomisioning, penutupan, dan pasca-penutupan tambang.

Secara global, harapan masyarakat yang semakin meningkat akan mendorong penerapan strategi pengelolaan praktik kerja unggulan DAL di negara maju maupun negara berkembang.

Faktor tambahan yang menyulitkan untuk mengelola risiko DAL di daerah tangkapan aliran sungai (DAS) di negara berkembang adalah potensi pertambangan rakyat. Beberapa kegiatan pertambangan skala kecil (baik legal maupun ilegal) dapat membuat dampak kumulatif lingkungan yang berdekatan dengan tambang aktif dan di lokasi tambang warisan. ICMM (2009) memberikan pedoman bagaimana industri dapat bekerja sama dengan penambang skala kecil.

Pedoman lebih lanjut tentang aspek-aspek utama dari keterlibatan internasional oleh perusahaan pertambangan disediakan dalam *Tanggung jawab sosial di sektor pertambangan dan logam di negara-negara berkembang (Social responsibility in the mining and metals sector in developing countries)* (DRET 2012).

9.0 EVALUASI DAN PEMANTAUAN KINERJA

Pesan-pesan kunci

- Pada awal proses evaluasi DAL, tetapkan kriteria kinerja yang spesifik, jelas dan dapat dicapai, dibingkai dari segi tujuan pengelolaan lingkungan keseluruhan lokasi secara keseluruhan.
- Sebuah model lokasi konseptual yang kuat dari proses DAL harus dikembangkan terlebih dahulu untuk mengidentifikasi parameter-parameter yang perlu dipantau dan lokasi untuk pemantauan.
- Karena oksidasi sulfida dimulai segera setelah persinggungan dengan oksigen dan air, program pemantauan pasca-dasar harus mulai segera setelah penempatan limbah yang mengandung sulfida.
- Tidak peduli seberapa baiknya program pemantauan dijalankan, pengumpulan data yang tidak tepat tidak akan membantu evaluasi kinerja dan bahkan dapat gagal untuk mengidentifikasi perkembangan masalah pengelolaan DAL.
- Lokasi-lokasi perusahaan yang beroperasi berisiko DAL pasca-rehabilitasi harus melakukan program monitoring pasca-rehabilitasi jangka panjang yang kuat, dengan penyediaan keuangan dan teknis yang tepat, guna memperlihatkan bahwa kriteria penutupan telah dipenuhi.

9.1 Pendahuluan

Evaluasi dan pemantauan kinerja adalah praktik-praktik yang biasa dilakukan di kalangan industri pertambangan. Hal ini dibutuhkan untuk membantu pengembangan praktik manajemen tambang yang baik dan untuk memperlihatkan kinerja yang efektif terhadap tujuan pengelolaan lingkungan yang telah disepakati kepada para pemangku kepentingan dan regulator. Pembuktian kinerja dicapai dengan mengidentifikasi apa yang perlu dievaluasi dan kemudian menentukan apa yang harus dipantau untuk menginformasikan evaluasi terbaik.

Tujuan bagian ini adalah untuk memberikan garis besar prinsip-prinsip evaluasi dan pemantauan kinerja dan beberapa contoh parameter yang dipantau untuk evaluasi DAL. Pedoman komprehensif tentang topik mengevaluasi dan pemantauan kinerja terdapat di buku pegangan praktik kerja unggulan *Mengevaluasi kinerja: pemantauan dan audit* (DIIS 2016c).

9.2 Evaluasi kinerja

Evaluasi kinerja menilai respons dari sistem dibandingkan dengan kriteria tertentu. Hal ini biasanya melibatkan pengukuran perubahan yang telah terjadi dan sering melibatkan pembuktian perubahan yang terjadi dalam menanggapi kondisi tertentu dan bahwa upaya tersebut diperlukan untuk menghasilkan perubahan yang hemat biaya.

Sedikitnya dua set kriteria kinerja perlu ditetapkan: pertama, mereka yang memberikan peringatan dini dari tren yang berkembang dan tindakan memicu manajemen lokasi untuk mengatasi masalah DAL; kedua, mereka yang terkait dengan pelaporan lokasi kinerja lingkungan kepada regulator dan para pemangku kepentingan.⁶⁸

⁶⁸ Proses untuk menetapkan kriteria terakhir ini dijelaskan dalam Bagian 5.

Pemicu peringatan dini perlu ditetapkan secara konservatif cukup guna memungkinkan tindakan manajemen yang harus diambil sebelum terdapat risiko ketidakpatuhan dengan pemicu peraturan eksternal.

Dalam konteks DAL, evaluasi kinerja dapat mencakup:

- menilai pengembangan DAL sebagai akibat dari kegiatan pertambangan
- mengidentifikasi kebutuhan dan strategi pengelolaan
- mengukur efektivitas dan strategi pengelolaan (yaitu, apakah strategi pengelolaan DAL mencapai tujuan yang dinyatakan atau tidak)
- menentukan apakah persyaratan yang disepakati telah terpenuhi (misalnya, spesifikasi pembangunan penutup WRD atau kepatuhan terhadap peraturan).

Program evaluasi kinerja DAL harus mencakup:

- tujuan khusus, yang jelas dan dapat dicapai, dibingkai dari segi tujuan pengelolaan DAL secara keseluruhan dan relevansi variabel terukur
- kriteria terhadap kinerja yang akan dievaluasi (ini akan membutuhkan pembentukan pemantauan lokasi dan/atau pengukuran dasar untuk kualitas air)
- kapasitas untuk mengaitkan penyebab penghasil DAL ke dampaknya pada karakteristik DAL
- model konseptual prosesor spesifik-lokasi dan karakteristik lokasi DAL.

‘Variabel kuantitatif yang relevan’ yang telah disebutkan dalam poin pertama di atas idealnya harus langsung dapat diukur, tetapi dalam beberapa kasus kuantifikasi akan bergantung pada pemantauan variabel terkait. Hubungan antara variabel harus sedapat mungkin langsung. Misalnya, dalam pengukuran kadar oksidasi sulfida in situ dalam WRD sulit, dan dalam praktiknya cenderung lebih efektif untuk mengukur konsentrasi oksigen dan distribusi suhu.

9.3 Model konseptual lokasi proses-proses DAL

Mengembangkan model proses-proses konseptual spesifik-lokasi yang akan mempengaruhi karakteristik DAL meningkatkan kemungkinan mengidentifikasi penyebab perubahan yang berakibat pada DAL dan karena itu membantu dalam mengidentifikasi variabel yang harus dipantau. Pemahaman model yang buruk dapat menyebabkan pemantauan set variable yang salah atau mengukur pada saat yang salah atau di tempat yang salah. Tidak peduli seberapa ketat program pemantauan, pengumpulan data yang tidak tepat tidak akan membantu evaluasi kinerja dan bahkan mungkin gagal untuk mengidentifikasi pengembangan isu utama pengelolaan DAL. Pengumpulan data yang tidak tepat juga dapat menunda pemberian izin atau persetujuan, karena data tersebut akan gagal untuk meyakinkan para regulator.

Model konseptual yang komprehensif yang mendasari program evaluasi kinerja untuk DAL akan mencakup, antara lain:

- kondisi perbatasan, seperti yang diwakili oleh arus masuk dan keluar dari area tertentu
- kondisi awal untuk berbagai proses, termasuk kondisi lokasi sebelum penambangan
- topografi dan iklim lokasi
- lokasi sulfida dan karbonat mineral
- mekanisme yang menentukan tingkat pasokan oksigen yang mendukung oksidasi sulfida
- kontrol geokimia (seperti penambahan kapur selama konstruksi WRD)
- jalur hidrologi dan hidrogeologi dan pemantauan
- lokasi dan jenis dampak
- keberadaan pengolahan air
- estimasi awal dari laju proses-proses yang relevan (misalnya, oksidasi sulfida) dan nilai-nilai parameter yang terkait.

Untuk evaluasi kinerja yang efektif, model konseptual harus dikembangkan ke tingkat rinci yang mencakup pertimbangan jeda waktu untuk pengembangan DAL, potensi durasi proses, saat-saat di mana mungkin terdapat peluang untuk membangun strategi manajemen guna pemantauan DAL, dan saat di mana mungkin tidak ada kesempatan lagi. Model ini akan membantu dalam menetapkan prioritas pemantauan yang diperlukan untuk evaluasi kinerja.

Model konseptual lokasi yang dipahami dengan baik memberikan landasan untuk desain program pemantauan DAL yang efektif guna mengevaluasi kinerja. Hal ini harus dikembangkan pada tahap sedini mungkin, idealnya pada kelayakan, tapi pasti sebelum lokasi menjadi operasional.

9.4 Pemantauan

Pemantauan adalah pembuatan seri intermiten pengamatan untuk mengukur perubahan dari waktu ke waktu. Model konseptual yang dikembangkan untuk lokasi dengan menggunakan teknik yang dijelaskan di bagian sebelumnya dalam buku pedoman ini harus digunakan untuk mengidentifikasi:

- variabel mana yang akan dipantau dan pada berapa frekuensi
- kapan komponen tertentu dari program pemantauan harus ditetapkan
- lokasi dan waktu yang tepat untuk pemantauan pengendalian dan lokasi dasar
- berapa lama durasi pemantauan tersebut
- di mana pemantauan akan terjadi (yaitu, persyaratan lokasi pemantauan dan distribusi spasial pemantauan tersebut)
- rentang nilai variabel yang dipantau yang mungkin memakan waktu periode pemantauan tersebut.

Hasil setelah mempertimbangkan tujuan lokasi tertentu dan model konseptual DAL akan menjadi program monitoring yang dirancang untuk menangkap informasi yang diperlukan secara praktis dan efektif biaya. Sangat mungkin bahwa program secara keseluruhan akan dilakukan secara bertahap dari waktu ke waktu dan dibagi menjadi satu set yang lebih kecil, komponen yang lebih terfokus. Tabel A.1 dalam Lampiran 1 memberikan pedoman rujukan rinci untuk parameter yang mungkin dipantau, lokasi dan saat-saat pemantauan serta kriteria evaluasi potensi kinerja. Kompilasi ini tidak dimaksudkan untuk menjadi preskriptif dan harus disesuaikan untuk digunakan jika diperlukan.

Jumlah variabel yang akan dimonitor tergantung pada kondisi dan tujuan dari program pemantauan, serta tingkat risiko DAL di lokasi. Akibatnya, mungkin perlu untuk memantau sejumlah variabel independen yang berpotensi mempengaruhi variabel dependen tertentu sehingga dapat meningkatkan kemungkinan untuk menentukan sebab dan akibat saat mengevaluasi proses kritis atau kinerja pengelolaan DAL.

Sumber daya yang diperlukan untuk pemantauan termasuk personil untuk menjalankan dan untuk menginterpretasikan hasil program pemantauan dan peralatan yang digunakan untuk pemantauan serta penyimpanan data. Distribusi di antara keduanya tergantung pada biaya, kehandalan, kelayakan teknis, ketersediaan, kontinuitas yang diperlukan operasi, dan kapasitas untuk merespons peristiwa ekstrem (misalnya, staf sering tidak tersedia untuk merespons saat curah hujan yang intens berlangsung lama).

Pertimbangan yang cermat harus diberikan pada penggunaan sumber daya yang ada atau bekerja bersama dengan studi yang dilakukan untuk tujuan lain. Kesempatan tersebut memiliki potensi untuk mengurangi biaya. Misalnya, logging dan pengambilan sampel lubang-lubang bor yang dipasang terutama untuk eksplorasi, karakterisasi geoteknik dan tujuan pengeringan dapat membantu dalam mengidentifikasi potensi DAL dan menghindari kebutuhan untuk pengeboran lubang yang didedikasikan untuk DAL sampling. Namun, lubang tersebut tidak mungkin tepat untuk pemantauan kualitas air, dan perlu dicatat bahwa sering ada persaingan akses untuk mengebor sampel inti antar disiplin.

Penggunaan fasilitas pemantauan yang dipasang untuk tujuan lain mungkin tidak memberikan informasi yang dibutuhkan. Misalnya, pemantauan kualitas air tanah menggunakan bor pemantauan ketinggian muka air yang ada di tepi lahan sewa guna untuk menentukan apakah mungkin TSF atau WRD memproduksi DAL atau tidak. Meskipun lubang bor mungkin tersedia tanpa biaya dan sampel tambahan air mungkin mudah dikumpulkan selama kunjungan rutin untuk menentukan ketinggian muka air, arah aliran air tanah atau laju aliran mungkin sedemikian sehingga DAL yang dilepaskan dari TSF tidak akan tiba di lokasi pemantauan selama berpuluh-puluh tahun.⁶⁹

Pilihan yang tepat dari peralatan pengukuran memiliki potensi untuk meningkatkan kemungkinan akurasi data, frekuensi dan kesinambungan sekaligus mengurangi biaya tenaga kerja dan mengatasi masalah akses seperti keamanan dan potensi kerusakan daerah sensitif dari pergerakan lalu lintas untuk diulang. Karena keanekaragaman dan kemampuan peralatan pemantauan, data logging dan telemetri terus berkembang, efisiensi dalam pengaturan dari program ini kemungkinan berasal dari konsultasi awal dengan para pemasok peralatan dan pemasang (installer).

9.4.1 Contoh parameter untuk memantau di lokasi

Oksidasi sulfida

Tanpa oksigen, mineral sulfida tidak akan teroksidasi untuk menghasilkan DAL, meskipun mineral sekunder seperti jarosit dapat terus melepaskan kemasaman dalam kondisi anoksik jika oksidasi telah terjadi. Pengendalian yang segera terhadap pasokan oksigen merupakan peluang terbaik operator tambang untuk mengendalikan laju produksi asam dan sulfat, dan harus menjadi pertimbangan utama terdepan saat mengembangkan strategi pengelolaan DAL.

Karena oksidasi sulfida dimulai segera setelah persinggungan dengan oksigen dan air, manfaat jangka pendek dan jangka panjang yang terbaik akan dicapai dengan membatasi pasokan oksigen segera setelah penempatan limbah yang mengandung sulfida.⁷⁰

Karena strategi pengelolaan pasokan oksigen paling efektif jika diterapkan segera setelah paparan awal dan penempatan limbah, maka diperlukan program pemantauan yang menyediakan umpan balik dalam jangka waktu tersebut. Hanya dengan umpan balik jangka pendek akan memungkinkan mengidentifikasi masalah kinerja tepat waktu untuk menerapkan tindakan korektif.

Mengingat kemungkinan waktu yang panjang untuk perembesan air untuk membawa produk-produk oksidasi dari bentuk lahan limbah ke air permukaan atau air tanah, pemantauan rembesan tidak akan memberikan masukan dalam jangka waktu yang diperlukan untuk memperlihatkan bahwa strategi untuk membatasi pasokan oksigen sudah efektif.

69 Informasi lebih lanjut tentang pemantauan air tanah terdapat dalam buku pegangan praktik kerja unggulan *Mengevaluasi kinerja: pemantauan dan audit* (DIES 2016 c).

70 Sebuah diskusi rinci dari teori transportasi oksidasi dan gas di Blowes dan Jambor (1994) dan di Blowes et al. (2003).

Sebuah metode praktis dan terbukti untuk mengevaluasi kinerja strategi pengelolaan pasokan oksigen didasarkan pada pengukuran konsentrasi oksigen dan distribusi suhu dalam limbah (Harries & Ritchie 1985; Garvie & Taylor 2000). Interpretasi data tersebut dapat menghasilkan estimasi kadar keseluruhan oksidasi, laju produksi asam dan sulfat, penilaian terhadap mekanisme pasokan oksigen yang dominan dan penilaian kebutuhan untuk strategi pengelolaan atau efektivitas strategi pengelolaan yang ada. Distribusi oksigen maupun suhu harus diukur guna memungkinkan untuk memberikan penjelasan khas dari data yang diamati.⁷¹

Kualitas air

Kualitas air permukaan dan air tanah sering dianggap sebagai fokus utama dari program pemantauan DAL. Namun, kualitas air merupakan indikator tertinggalnya perkembangan masalah DAL, karena biasanya diukur pada titik-titik rembesan yang keluar dari fasilitas pengelolaan limbah tambang. Indikasi sebelum pengembangan kualitas air rembesan dapat diperoleh dari sampling lisimeter (dari skala yang tepat) yang dipasang seiring dengan kemajuan pembangunan atau dari bor-bor pemantauan yang dipasang dan diperpanjang dengan kenaikan tingkat fasilitas. Namun, harus berhati-hati dalam desain dan pemasangan sistem pemantauan tersebut untuk meminimalkan potensi kerusakan fisik dan data monitoring yang salah.

Parameter kualitas air awal untuk diukur akan telah ditetapkan oleh temuan dari uji statis dan kinetik yang dijelaskan dalam Bagian 4. Namun, kisaran awal parameter tersebut harus ditinjau kembali secara berkala dan direvisi jika diperlukan, berdasarkan pengalaman operasional yang berkembang.

Neraca air fasilitas limbah

Tujuan umum desain penyimpanan limbah praktik kerja unggulan adalah untuk meminimalkan interaksi infiltrasi air dengan bahan berisiko DAL. Oleh karena itu, pemantauan infiltrasi air bersih ke fasilitas penyimpanan limbah merupakan hal yang penting, dan tingkat penurunan infiltrasi air bersih merupakan indikator kinerja utama untuk kebanyakan sistem lapisan penutup.

Infiltrasi air bersih ke fasilitas penyimpanan limbah dapat disimpulkan oleh hasil pemantauan yang dihasilkan oleh sejumlah pendekatan yang berbeda, masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan (O’Kane 2011; Schneider et al 2010). Idealnya, beberapa metode harus digunakan secara paralel untuk memastikan tingkat kehandalan yang tinggi dalam hasil yang diperoleh.

9.5 Penyimpanan data, evaluasi dan pelaporan

Besarnya usaha yang diperlukan untuk menyimpan, mengelola dan menafsirkan banyak aliran data yang merupakan bagian dari program pemantauan AMD yang tidak boleh dianggap remeh. Mungkin harus sering melibatkan bantuan eksternal untuk melengkapinya sumber daya yang tersedia di lokasi.

Tahap interpretasi data dari evaluasi kinerja jauh lebih cepat dan lebih mudah jika data pemantauan disimpan di tempat yang aman di urutan yang logis dengan semua metadata kritis yang terkait dan dalam format yang mudah diambil kembali. Membangun proses yang secara otomatis mengatur data dan file dapat menghemat banyak jam kerja pada tahap pengolahan data. Penyimpanan yang terorganisir dengan baik juga dapat mengurangi kemungkinan untuk kesalahan dan mempermudah proses audit.

71 Dua studi kasus pada Bab 6 menggambarkan penggunaan konsentrasi oksigen dan pengukuran suhu untuk menilai efektivitas lapisan penutup tanah di atas batuan sisa yang mengandung sulfida, dikombinasikan dengan metode konstruksi atas tanah menggunakan lift dangkal.

Sistem-sistem penyimpanan data yang ada mungkin tepat dan juga sarana yang sangat berharga untuk menyimpan data. Misalnya, menggabungkan hasil uji statis dalam model geologi yang telah mapan di tambang dapat memberikan metode yang relatif mudah untuk membandingkan hasil uji statis dengan data jenis batuan lain.

Data pemantauan harus ditinjau, ditafsirkan dan dievaluasi terhadap kriteria kinerja secara berkala. Sebuah pendekatan pragmatis adalah melakukan evaluasi pada waktu yang ditentukan selagi data tersebut tersedia. Hal ini berpotensi manfaat untuk mengidentifikasi:

- peralatan pemantauan yang rusak
- kebutuhan untuk mempertimbangkan kembali model konseptual dan memonitor variabel tambahan untuk mendapatkan evaluasi yang lebih jelas
- tren yang memperlihatkan masalah DAL yang berkembang.

Mengkomunikasikan hasil pemantauan, baik secara internal maupun eksternal, sangat penting untuk keberhasilan keseluruhan strategi pengelolaan DAL. Hanya dengan komunikasi yang memadai bahwa perubahan yang sesuai akan dilakukan selama tahap operasi dan mencegah banyak masalah jangka panjang serta kesulitan yang berkaitan dengan DAL yang harus dihadapi pada penutupan tambang. Komunikasi yang efektif dari hasil pemantauan dan dari hasil evaluasi kinerja dengan para pemangku kepentingan dan regulator merupakan salah satu pilar pengelolaan permasalahan DAL praktik kerja unggulan.

Data pemantauan yang diperoleh selama tahap operasi akan memberikan dasar untuk peninjauan kembali, dan memperbarui jika diperlukan, rencana penutupan tambang lewat konsultasi dengan pemangku kepentingan terkait. Jika data pemantauan memperlihatkan bahwa minimalisasi efektif atau strategi pengendalian telah dilaksanakan selama operasi, akan ada keyakinan lebih besar bahwa penutupan akan berhasil.⁷²

⁷² Rincian lebih lanjut tentang pemantauan dan evaluasi kinerja penutupan terdapat dalam buku pegangan praktik kerja unggulan Penutupan tambang (DIIS 2016a) dan Mengevaluasi kinerja: pemantauan dan audit (FIIS 2016 c).

10.0 MENGGOMUNIKASIKAN PERMASALAHAN DAL KEPADA PARA PEMANGKU KEPENTINGAN DAN INVESTOR

Pesan-pesan kunci

- Keterlibatan yang efektif dengan para pemangku kepentingan pada tahap awal proyek adalah hal yang penting untuk mengidentifikasi dan menyetujui nilai-nilai yang perlu dilindungi.
- Operasi yang transparan, berkomunikasi dengan jelas dan akuntabel akan dilihat menguntungkan untuk komitmennya pada keberlanjutan dan untuk mempertahankan izin sosial untuk beroperasi.
- Komunikasi dalam bentuk yang dapat dimengerti dan berkaitan langsung untuk memperlihatkan perlindungan nilai-nilai yang disepakati cenderung menjadi pendekatan yang paling bermanfaat.
- Bagian penting dari proses untuk memperoleh investasi guna pengembangan sumber daya mineral baru ialah mengestimasi nilai potensinya.
- Kode JORC maupun kode VALMIN untuk mengestimasi dan melaporkan tingkat dan nilai sumber daya memerlukan aspek yang secara material dapat mempengaruhi nilai proyek (seperti biaya risiko DAL dan pengelolaan limbah) untuk ditangani secara implisit.

10.1 Ikhtisar

Bagian sebelumnya dari buku ini berfokus pada bagaimana pendekatan praktik kerja unggulan mengarah ke aspek teknis dari siklus hidup pertambangan harus digunakan untuk meminimalkan risiko DAL. Namun, pertambangan selalu juga terjadi pada peraturan sosial dan lanskap yang terdiri dari masyarakat yang berpotensi terkena dampak, kelompok pemangku kepentingan lainnya, instansi pemerintah dan investor proyek. Cara interaksi ini ditangani dan dikelola oleh perusahaan tambang sangat mempengaruhi perizinan pertambangan, regulasi dan penutupan tambang, serta bagaimana umumnya pandangan masyarakat terhadap industri pertambangan.⁷³

Mengingat lebih dari 60% dari operasi pertambangan Australia bertetangga dengan masyarakat Pribumi, pertimbangan khusus harus diberikan untuk Penduduk Pribumi Australia sebagai pemangku kepentingan utama atau, seperti berpendapat beberapa orang, 'pemegang hak', sebagai pengakuan atas hak-hak adat dan kepentingan dan hubungan khusus masyarakat adat atas tanah dan air.

Mengidentifikasi potensi masalah DAL selama tahap eksplorasi dan kelayakan di lokasi greenfield sangat penting, seperti yang tahap-tahap memberi masukan kepada:

- konsultasi yang harus terjadi sebagai bagian dari komponen EIA dari proses perizinan proyek
- valuasi ekonomi sumber daya yang dilaporkan ke pasar saham dan calon investor proyek (lihat di bawah).

Keterlibatan yang efektif dalam tahap awal dengan masyarakat yang berpotensi terkena dampak dan pihak-pihak utama lainnya, termasuk para regulator, amat penting untuk mengidentifikasi dan menyetujui nilai-nilai yang perlu dilindungi, dan yang mendukung spesifikasi kriteria kinerja lingkungan proyek.

⁷³ Fokus dalam bagian ini pada komunikasi permasalahan yang terkait dengan DAL. Untuk pembahasan yang lebih luas dari strategi untuk komunikasi dan keterlibatan praktik kerja unggulan, lihat buku pegangan praktik kerja unggulan *Keterlibatan dan Pengembangan Masyarakat* (DIIS 2016b) dan *Bekerja dengan masyarakat Pribumi* (DIIS 2016d).

Akuisisi data teknis kualitas dari program pemantauan kinerja tepat sasaran sangat penting untuk pengelolaan lingkungan yang efektif oleh perusahaan tambang. Namun, komunikasi informasi dalam bentuk yang dapat dimengerti dan berhubungan langsung dengan memperlihatkan perlindungan nilai-nilai yang disepakati yang mungkin menjadi pendekatan inilah yang mungkin paling bermanfaat. Operasi yang transparan, yang berkomunikasi dengan jelas dan akuntabel akan dilihat menguntungkan untuk komitmennya untuk keberlanjutan dan untuk mempertahankan izin sosial untuk beroperasi. Praktik kerja unggulan melibatkan pengakuan bahwa ada kewajiban terhadap pemangku kepentingan dan tuntutan UU yang ketat.

Communities generally assess how the company has performed in maintaining its social licence by:

- sejauh mana dan sifat dari komunikasi (misalnya, apakah transparan?)
- sejauh mana pekerjaan telah sesuai dengan praktik kerja unggulan
- sejauh mana menepati janji-janji dan memenuhi komitmennya.

Jika masalah kinerja kemudian muncul, masyarakat dan juga para regulator yang berpotensi sama-sama terkena dampak, kemungkinan besar akan mendengarkan dan membahas masalah dan mengusulkan tindakan manajemen yang beralasan daripada jika sebelumnya belum ada komunikasi periodik dan terbuka. Khususnya, mengkomunikasikan strategi manajemen dan sistem yang ditempatkan pada pengelolaan risiko DAL memberikan konteks yang penting dan memperlihatkan niat serius operasi untuk meminimalkan risiko dampak. Program pemantauan kualitas air partisipatif masyarakat juga telah digunakan untuk mengurangi dan mengelola konflik yang terkait dengan pertambangan dengan memungkinkan masyarakat lebih terinformasi untuk membuat keputusan (CAO 2008).

Pengumpulan dan analisis data reguler, diikuti dengan siaran humas (public release) data mentah maupun data yang ditafsirkan, termasuk penilaian tren jangka panjang dan bagaimana mereka dibandingkan dengan tingkat perlindungan yang diperlukan untuk mempertahankan nilai-nilai lingkungan, bersama dengan konsultasi dan keterlibatan masyarakat, merupakan bagian integral pengelolaan DAL praktik kerja unggulan yang bertanggung jawab. Sementara pengumpulan dan publikasi data mungkin menjadi persyaratan legislatif, apa yang saat ini secara terbuka dikomunikasikan sering jauh dari standar praktik kerja unggulan. Saat ini, pelaporan publik tentang data DAL terkait dengan perusahaan pertambangan sangat terbatas, terutama pada seberapa banyak bahan sulfida yang diproduksi dan seberapa efektif pengelolaan bahan tersebut.

10.2 Kerangka kerja pelaporan

10.2.1 Lingkungan dan pelaporan keberlanjutan

Potensi kerangka kerja untuk melaporkan berbagai hal yang terkait dengan DAL meliputi:

- laporan tahunan keberlanjutan perusahaan—informasi tentang aspek sosial, ekonomi dan lingkungan dari operasi pertambangan (atau perusahaan secara keseluruhan)
- rencana pemantauan air dan data kualitas air ditafsirkan dalam konteks nilai-nilai yang harus dilindungi, termasuk data pada tren jangka panjang musiman
- rencana rehabilitasi dan penutupan (misalnya, sejalan dengan DMP-EPA 2015) yang mencakup strategi untuk identifikasi, pengelolaan dan remediasi DAL
- konsultasi/pelibatan masyarakat dan pemangku kepentingan—laporan, lembar fakta, kit informasi, presentasi, pertemuan dan lokasi yang didedikasikan⁷⁴
- Prakarsa Pelaporan Global (Global Reporting Initiative (GRI))⁷⁵—kerangka kerja global untuk pelaporan keberlanjutan perusahaan—dan kerangka kerja Nilai Bertahan (Enduring Value) untuk perusahaan pertambangan Australia (MCA 2005a).

⁷⁴ Rujuk buku pegangan praktik kerja unggulan *Keterlibatan dan pengembangan masyarakat* (DIIS 2016b) dan [sumber daya ICMM](#).

⁷⁵ <http://www.globalreporting.org>.

10.2.2 Pelaporan penilaian sumber daya

Bagian penting dari proses untuk memperoleh investasi guna pengembangan sumber daya mineral baru mengestimasi nilai potensinya dengan menggunakan prosedur standar. Standar yang paling luas diakui untuk melakukan hal ini adalah Kode Komite Gabungan Cadangan Bijih tahun 2012 (Joint Ore Reserves Committee Code) (JORC Code) dan Kode Pengkajian Teknis dan Penilaian Mineral dan Aset Perminyakan dan Keamanan untuk Pelaporan Ahli Independen tahun 2005 (Code for the Technical Assessment and Valuation of Mineral and Petroleum Assets and Securities for Independent Expert Reports (VALMIN Code)). Kedua kode tersebut mengharuskan laporan masyarakat disiapkan untuk tujuan menginformasikan pada investor tentang hasil eksplorasi, sumber daya atau cadangan mineral, dan penilaian terkait yang memperhitungkan kewajiban reklamasi dan rehabilitasi di samping faktor-faktor lain yang secara material dapat mempengaruhi nilai ekonomi sumber daya.

Kode JORC

Kode JORC adalah kode profesional praktik kerja unggulan yang menetapkan standar minimum untuk pelaporan humas tentang hasil eksplorasi mineral, sumber daya mineral dan cadangan bijih. Kebutuhan untuk mengestimasi unsur yang terjadi bersamaan yang bersifat merusak dalam sumber daya atau variabel non-grade (tidak memiliki ukuran skala) lainnya yang secara ekonomi signifikan (seperti sulfur untuk karakterisasi DAL) dan mencirikan limbah juga disertakan. Aspek lingkungan dan sosial tercakup di dalam 'faktor-faktor modifikasi'. Klausul 12 dari kode tersebut membahas bagaimana kerja faktor modifikasi dengan rincian pada Tabel 3 di Bagian 4. Secara khusus, 'orang yang kompeten' (didefinisikan dalam kode) diperlukan untuk mengatasi:

status penelitian potensi dampak lingkungan dari operasi penambangan dan pengolahan. Rincian karakterisasi batuan sisa dan pertimbangan lokasi potensial, status pilihan desain yang diperhitungkan dan, di mana berlaku, status perizinan untuk proses penyimpanan residu dan WRD harus dilaporkan.

Kode VALMIN

Kode VALMIN membutuhkan laporan sewa guna pertambangan yang dibuat oleh seorang ahli independen untuk memberikan rincian potensi kewajiban reklamasi dan rehabilitasi/biaya serta risiko geologi dan ketidakpastian proyek. Pengolahan/pengelolaan limbah dan tailing secara khusus dibahas dalam ketentuan capex dan opex Klausul 92.

10.3 Penutupan tambang dan rehabilitasi

Para regulator dan pemangku kepentingan yang terpengaruh harus dilibatkan sedini mungkin dalam pengembangan tujuan penutupan tambang dan kriteria untuk lokasi berisiko DAL. Kriteria produksi yang disepakati merupakan hal yang penting karena, untuk sebagian besar, kriteria tersebut akan menentukan besarnya dan biaya rekayasa yang diperlukan dan pekerjaan rehabilitasi lainnya. Kegagalan untuk mengembangkan kriteria tersebut cukup jauh di muka akan selalu menyebabkan keterlambatan yang berlarut-larut (dan mahal) dalam kemampuan untuk menyelesaikan pekerjaan rehabilitasi (Dowd 2005).

Banyak komunitas memiliki keprihatinan yang dapat dipahami tentang kapasitas jangka panjang struktur perekayasa untuk mengisolasi bahan sulfidik dan meminimalkan DAL. Ekstrapolasi ke masa depan merupakan masalah teknis yang sangat sulit. Konsultasi dapat membantu mengidentifikasi strategi lokal yang tepat untuk mengelola permasalahan DAL dan memastikan bahwa kendala ekonomi, teknis dan peraturan ditangani secara memuaskan.

Pengaktifan kembali lokasi brownfield sering membutuhkan keterlibatan kembali dengan masyarakat tentang konsep proyek baru untuk memperlihatkan bagaimana metode pengelolaan DAL praktik kerja unggulan akan diterapkan. Sebuah area risiko atau konflik tertentu adalah komitmen asli yang dibuat oleh pemilik pertama proyek, karena tidak biasa (kecuali proyek memiliki kehidupan yang sangat singkat) untuk perusahaan yang pertama membuka tambang untuk juga berada di sana untuk menutupnya di akhir LOM.

Proyek-proyek baru perlu mengukur dan melaporkan risiko DAL dari masa lalu untuk memperlihatkan kepada masyarakat dan regulator bagaimana agar dapat menghasilkan hasil yang lebih baik dari pertambangan, pengolahan dan/atau kegiatan pengolahan air lebih lanjut. Pertimbangan serupa juga berlaku guna mengembangkan dan melaksanakan rencana rehabilitasi untuk lokasi warisan.

11.0 KETERANGAN PENUTUP DAN PELUANG MASA DEPAN

Pesan-pesan kunci

- Nilai ekonomi sebenarnya dari proyek sumber daya mineral hanya akan terwujud dengan mengidentifikasi risiko DAL sejak awal dan dengan mencegah pembentukan DAL sebelum, selama dan setelah operasi.
- Sebagian besar pengetahuan yang diperlukan untuk mencegah DAL sudah ada. Hanya implementasi pengetahuan tersebut yang lambat. Prinsip praktik unggulan untuk pengelolaan risiko DAL saat ini belum dipahami atau diterapkan secara universal.
- Jika oksidasi berisiko bahan tambang sulfida dapat dicegah dari awal, kemungkinan untuk berhasil jauh lebih tinggi dan memenuhi kualitas air operasional dan sasaran kinerja penutupan tambang secara berkelanjutan.
- Perbaikan dalam pendekatan pada pengelolaan limbah sulfida dan dalam pengobatan DAL akan terus dilakukan, tapi ini seharusnya tidak menunda pelaksanaan praktik terkemuka saat ini untuk mencegah dampak jangka panjang di masa depan.
- Izin sosial perusahaan pertambangan untuk mengoperasikan secara signifikan dipengaruhi oleh dampak pada air dan kualitas tanah selama operasi dan setelah penutupan. DAL adalah warisan lingkungan yang paling signifikan dan berdampak dalam persepsi masyarakat.
- Catatan pemantauan perlu disusun dan dikomunikasikan kepada public oleh kalangan industri dan regulator untuk dengan kuat memperlihatkan keberhasilan mitigasi risiko AMD dalam jangka panjang.

11.1 Gambaran besar

Nilai sebenarnya dari sumber daya mineral dalam konteks pembangunan ekonomi berkelanjutan hanya akan terwujud dengan mencegah DAL sebelum, selama dan setelah operasi pertambangan. Jika hal ini tidak ditangani, akan terus menjadi biaya besar yang tak tersedia untuk penutupan menjelang akhir hidup proyek, bersama dengan risiko yang berkelanjutan untuk lingkungan dan reputasi industri.⁷⁶

Selain dampak langsung pada keuangan proyek, biaya bagi industri untuk meminta izin sosial untuk beroperasi sebagai akibat dari persepsi tentang kinerja masa lalu sangat besar, termasuk penundaan yang lama dalam perizinan proyek atau penolakan izin untuk pembangunan yang diusulkan.

11.2 Teknologi pencegahan dan mitigasi

Sejumlah besar pekerjaan yang telah dilakukan selama tiga dekade terakhir untuk memahami sifat DAL, guna memprediksi terjadinya dan mengembangkan solusi praktis untuk mengelola yang dihasilkan dan pelepasannya. Banyak teknologi yang dijelaskan dalam buku ini, karena sekarang sedang diimplementasikan secara cepat dan menyeluruh. Kini pemantauan data kinerja besar-besaran memperlihatkan bahwa cara terbaik untuk mencegah DAL adalah dengan menerapkan strategi pengelolaan limbah tambang yang efektif dari awal operasi. Secara khusus, jika oksidasi berisiko bahan sulfida dapat dicegah, ada kemungkinan jauh melampaui dari memenuhi

⁷⁶ Contoh biaya langsung yang dikeluarkan untuk retroaktif pengelolaan DAL dalam Bagian 1

tujuan kualitas air operasional dan kemudian memenuhi kriteria kinerja penutupan, yang keduanya secara signifikan mengurangi pengeluaran yang sedang berlangsung.

Banyak, jika bukan sebagian besar, dari pengetahuan yang diperlukan untuk mencegah DAL sudah ada. Kasusnya sekarang adalah menggunakannya dengan rajin dan efektif, dari karakterisasi hingga penempatan dan pengendalian bahan tambang sulfida. Dalam kasus DAL, pepatah 'a stitch in time saves nine' (menjahit robekan secepatnya lebih baik daripada setelah menjadi besar memerlukan jahitan yang lebih banyak) sangat tepat. Sebagaimana dicatat di berbagai tempat dalam buku ini, prinsip praktik kerja unggulan untuk pengelolaan risiko DAL saat ini belum dipahami atau diterapkan secara universal.

Perbaikan inkremental dalam menilai risiko DAL akan terus dilakukan sebagai metode prediksi yang disempurnakan dan pemahaman yang lebih baik diperoleh dari skala penelitian di laboratorium hingga ke skala lapangan. Pelajaran tentang desain, instalasi, pemeliharaan dan kinerja jangka panjang dari sistem penutup juga akan terus dicerna.

Meskipun belum ada solusi tunggal yang akan mencegah DAL di semua lokasi, jelaslah bahwa meminimalkan masuknya oksigen ke dalam batuan sisa tak teroksidasi dengan metode konstruksi ground-up (di atas tanah), dikombinasikan dengan pemadatan antar lapisan untuk membatasi aliran air, mungkin yang paling dekat dengan solusi 'universal' untuk sumber DAL ini. Dalam kasus tailing bersulfida, menjaga saturasi di seluruh massa tailing adalah cara yang paling efektif untuk mencegah oksidasi dalam jangka panjang. Dalam iklim kering, pemantauan infiltrasi dengan lapisan penutup simpan/lepas berkemungkinan besar menjadi cara yang paling praktis dan efektif untuk membatasi pelepasan produk oksidasi ke lingkungan.

Desulfurisasi tailing telah terbukti menjadi teknik yang sangat efektif, tidak hanya untuk mengurangi warisan risiko DAL dari TSF, tetapi juga untuk memproduksi bahan sulfur berkadar rendah, berbutiran halus, untuk digunakan dalam sistem lapisan penutup. Pada banyak lokasi, ketersediaan bahan NAF berbutir halus yang memadai adalah salah satu faktor pengendalian utama untuk membatasi risiko DAL secara efektif. Memang, akuisisi bahan urukan berbutiran halus dari daerah sekitar tambang dapat dibatasi atau dicegah dengan alasan lingkungan karena jaminan terhadap kerusakan substansial pada area pengurukan dan kebutuhan terkait untuk area tambahan untuk direhabilitasi. Terdapat lingkup penerapan yang lebih luas dari desulfurisasi tailing oleh industry.

Danau pit semakin menjadi fitur lanskap penutupan tambang untuk semua jenis komoditas mineral, baik di Australia maupun di tempat lain. Kesamaan dengan daerah lain dalam hal pengelolaan risiko DAL, pengetahuan tentang perilaku badan air ini pada hakekatnya telah maju, khususnya selama dekade terakhir. Namun, karena sifat fisik, kimia dan rumitnya sistem biologis tersebut, banyak pekerjaan yang diperlukan untuk meningkatkan kepercayaan dalam prediksi jangka panjang kualitas air untuk kasus-kasus di mana diperlukan kemandirian, sistem ekologi fungsional dan regional yang tepat. Sekali lagi, area ini akan mendapatkan manfaat dari sejumlah besar lokasi yang dipantau di mana opsi penutupan ini telah diusulkan atau dilaksanakan.

Di tambang bawah tanah, ada permasalahan yang tersisa yang melibatkan oksidasi berlanjut pada sulfida yang terpapar di atas lapisan air yang dipulihkan. Hal ini berlaku terutama untuk tambang di medan yang ditinggikan dengan jalan masuk horisontal atau miring yang tidak disumbat, yang terungkap di permukaan. Dalam kasus tersebut, menjaga atmosfer bawah tanah pada konsentrasi oksigen yang sangat rendah berpotensi mencegah oksidasi sulfida dan pelepasan drainase berkualitas rendah. Pendekatan ini (sistem atmosfer lembam) melibatkan penyumbatan kerja tambang bawah tanah dan memompakan gas dengan tekanan sedikit berlebih untuk mencegah masuknya oksigen dan meminimalkan oksidasi sulfida.

Munculnya teknologi dan peluang masa depan yang menawarkan potensi yang signifikan untuk pengelolaan DAL, tergantung pada uji coba lapangan skala besar yang sukses, antara lain:

- pelepasan gabungan tailing dengan batuan sisa (batuan pasta), dimana tailing berbutiran halus mengisi rongga di batuan sisa (Longo & Wilson 2007)
- mengurangi muatan kemasaman dalam air drainase dari WRD dengan menerapkan pelepasan kebasaaan lapisan penutup (permukaan) yang menghasilkan kebasaaan yang cukup agar permukaan sulfida di bawahnya menjadi pasif
- rekayasa geokimia (lihat Glosarium) WRD untuk mengurangi pembentukan mineral pembentuk asam sekunder seperti jarosit dan memfasilitasi pembentukan fase mineral lebih stabil
- penambahan tanah liat yang strategis, jika diperlukan, untuk penyimpanan tailing yang terakhir setebal 1-2 m untuk secara signifikan menurunkan nilai-nilai masuknya air
- identifikasi dan penggunaan tailing NAF berkeandungan sulfur rendah dan batuan sisa untuk digunakan sebagai lapisan penghalang pengikat oksigen (oxygen-scavenging) dalam pembangunan fasilitas pembendungan limbah
- biaya teknologi pengolahan air yang lebih rendah (Lorax Lingkungan 2003) yang menyingkirkan sulfat pada laju pemuatan tinggi hingga konsentrasi cukup rendah untuk memenuhi standar pelepasan konsentrasi yang semakin ketat
- lebih baik menggunakan pola peledakan di dalam pit dan efisiensi ledakan untuk mengendalikan ukuran partikel, dan karenanya luas permukaan limbah sulfida reaktif dan limbah pembentuk kebasaaan untuk memaksimalkan efektivitas pengendalian geokimia dalam WRD.

11.3 Pemantauan, pelaporan dan izin sosial untuk beroperasi

Penting agar catatan pemantauan operasional dan pasca-penutupan yang lebih komprehensif yang diproduksi oleh kalangan industri dan regulator untuk dengan kuat memperlihatkan keberhasilan pengelolaan lokasi berisiko DAL dalam jangka panjang. Sayangnya, hanya ada beberapa contoh yang tersedia untuk umum untuk memperlihatkan praktik pertambangan yang berkelanjutan dalam konteks ini. Situasi ini semakin memberikan kontribusi bagi kurangnya kepercayaan, dan karenanya penarikan izin sosial untuk beroperasi, yang diperlihatkan oleh masyarakat dalam proposal proyek pertambangan baru di Australia dan luar negeri. Hal ini lebih diperparah dengan adanya banyak lokasi warisan yang mencolok yang semakin memperburuk hubungan antara mitigasi dan pengelolaan DAL dalam oposisi sosial masa lalu dan saat ini untuk pertambangan.

Jenis pemantauan yang diperlukan dijelaskan dalam Bagian 9. Seperti dicatat dalam Bagian 3, lokasi perusahaan yang beroperasi berisiko DAL pasca-rehabilitasi harus siap untuk melakukan program pemantauan pasca-rehabilitasi jangka panjang yang kuat, dengan penyediaan keuangan dan teknis yang tepat, serta untuk melakukan pekerjaan perbaikan jika dan seperti yang diperlukan. Temuan dan implikasi program pemantauan perlu dikomunikasikan dengan gamblang, seperti yang dijelaskan dalam Bagian 10.

Bahkan saat tindakan-tindakan mitigasi telah dimasukkan ke dalam operasi proyek, langkah-langkah ini sering tidak mencapai tujuan kinerja yang diprediksi (yang diinginkan). Misalnya, perbandingan antara prediksi dalam dokumen EIS dan kinerja telah menemukan bahwa 64% dari mode kegagalan untuk kualitas air yang diprediksikan versus kualitas air yang aktual pada tambang batuan keras adalah karena kegagalan untuk memenuhi tujuan kinerja (Kuipers et al. 2006). Hasil ini memperlihatkan bahwa masih ada beberapa cara untuk dilakukan agar pengelolaan risiko DAL mencapai praktik kerja unggulan seluruh industri.

LAMPIRAN 1

Tabel A.1—Unsur-unsur program pemantauan DAL

Fasilitas	Komponen	Parameter	Frekuensi ^a		Kriteria penilaian kinerja
			Tahap eksplorasi/kelayakan ^b	Tahap operasi	
Umum	Meteorologi	Curah hujan, penguapan, suhu, dll.	Dasar: setiap jam	Setiap jam	Tidak berlaku
	Tipe batuan	Litologi, kondisi pelapukan, konten sulfida and karbonat	Log (masukkan) semua tabung pengeboran (drill core), termasuk volume limbah	Log semua tabung pengeboran	Tidak berlaku
	Hidrologi—hulu dan hilir lokasi ^{cd}	Laju aliran	Dasar: harian	Setiap jam	Tidak berlaku
	Kualitas air permukaan—hulu dan hilir lokasi	Parameter umum kualitas air (lapangan)	Dasar: triwulanan	Harian/mingguan: tergantung peristiwa	Pedoman kualitas air Negara Bagian/nasional untuk air permukaan ambient (mis ANZECC-ARMCANZ 2000a). Dasar dan hulu.
		Jumlah solid tersuspensi, kemasaman/kebasaaan, ion-ion utama dan ligan, logam (laboratorium)	Tergantung peristiwa	Mingguan/bulanan: tergantung peristiwa	
	Hidrogeologi—lereng naik dan lereng turun lokasi ^{cd}	Tingkat ketinggian muka air bawah tanah, laju dan arah aliran air tanah	Dasar: triwulanan	Mingguan/bulanan	Tidak berlaku
		Parameter umum kualitas air (lapangan), mencakup jumlah solid tersuspensi, kemasaman/kebasaaan, ion-ion dan ligan-ligan utama, logam/metaloid (laboratorium)	Dasar: bulanan/tri wulanan	Mingguan/bulanan	Pedoman kualitas air Negara Bagian/nasional untuk air permukaan. Dasar dan lereng naik.
		Jumlah solid tersuspensi, kemasaman/kebasaaan, ion-ion dan ligan-ligan utama, logam/metaloid (laboratorium)	Dasar: tri wulanan/tahunan	Bulanan/tri wulanan	
	Sosial dan kultural (misalnya penggunaan air hilir)	Penggunaan air hilir (misalnya air minum, untuk perikanan/akuakultur, irigasi/pertanian, air minum ternak, mencuci, mandi, penambangan berskala kecil, pembangkit listrik tenaga air, rekreasi, nilai-nilai budaya, dsb.)	Dasar: tahunan	Tri wulanan/tahunan	Data dasar penggunaan air hilir.

Fasilitas	Komponen	Parameter	Frekuensi ^a		Kriteria penilaian kinerja
			Tahap eksplorasi/kelayakan ^b	Tahap operasi	
Umum	Vegetasi (misalnya lapisan penutup timbunan batuan sisa bervegetasi, area-area rehabilitasi lain, vegetasi alami di sekitar lokasi)	Luasnya tutupan vegetasi, dieback atau bidang-bidang lahan yang gundul (jika ada), keragaman flora dan fauna burung	Dasar: tri wulanan/tahunan	Bulanan/tri wulanan	Data dasar mengenai vegetasi alami atau area-area yang direhabilitasi
	Fauna perairan—hulu dan hilir lokasi	Ganggang, invertebrata mikro, ikan dan vertebrata yang lebih besar, dsb.	Dasar: Tengah tahunan (musiman)/tahunan	Tri wulanan/tengah tahunan (musiman)/tahunan; tergantung peristiwa	Data dasar fauna perairan hilir.
	Neraca air dan neraca kemasaman lokasi	Laju aliran/laju pemompaan, muatan kemasaman	Dasar	Harian	Volume air di lokasi cukup namun tidak berlebihan.
		Ketinggian muka air dan volume dalam fasilitas penyimpanan	Tidak berlaku	Harian	
	Titik-titik pelepasan	Laju aliran	Tidak berlaku	Harian: tergantung peristiwa	Tidak berlaku
		Parameter umum kualitas air (lapangan)	Tidak berlaku	Harian: tergantung peristiwa	Pedoman kualitas air untuk air pelepasan Negara Bagian/nasional/internasional (misalnya, IFC 2004). Pencampuran zona penting.
		Jumlah solid tersuspensi, kemasaman/kebasaaan, ion-ion dan ligan-ligan utama, logam/metaloid (laboratorium)	Tidak berlaku	Bulanan/tri wulanan: tergantung peristiwa	
	Geokimia untuk produksi	Klasifikasi geokimia tanah/batuan (uji-uji statis)	Tidak berlaku	Seperti disyaratkan untuk pengendalian operasional (misalnya, sampel lubang-lubang ledakan, sampel muka)	Pemodelan prediksi-prediksi.
		Geokimia untuk tailing pabrik (uji-uji statis)	Tidak berlaku	Seperti disyaratkan	Pemodelan prediksi-prediksi.
	WRD dan stockpile bijih	Batuan sisa dan bahan bijih	Laju batuan sisa dan bahan bijih, massa/volume timbunan batuan sisa dan stockpile bijih	Pemodelan prediksi-prediksi	Harian
Karakterisasi geokimia litologi (uji statis dan kinetic)			Dasar: seperti disyaratkan	Seperti disyaratkan	Tidak berlaku
WRD (dalam waktu konstruksi atau dalam timbunan-timbunan brownfield)		Konsentrasi oksigen ruang pori dan suhu (in situ)	Bulanan	Bulanan	Pemodelan data.
Hidrologi (limpasan air permukaan dan rembesan permukaan)		Laju aliran (limpasan air permukaan, rembesan permukaan)	Tidak berlaku	Mingguan	Tidak berlaku

Fasilitas	Komponen	Parameter	Frekuensi ^a		Kriteria penilaian kinerja
			Tahap eksplorasi/kelayakan ^b	Tahap operasi	
WRD dan stockpile bijih	Kualitas air (limpasan air permukaan dan rembesan permukaan)	Parameter kualitas-air umum (lapangan)	Tidak berlaku	Mingguan	Data dasar dan hulu. Kualitas air yang diprediksikan.
		Jumlah solid tersuspensi, kemasaman/kebasaaan, ion-ion dan ligan-ligan utama, logam/metaloid (laboratorium)	Tidak berlaku	Bulanan	
Hidrogeologi (air dalam timbunan batuan sisa; air tanah di timbunan lereng atas, bawahnya and lereng bawah)		Laju infiltrasi timbunan batuan sisa (tekanan pori/hidrolik/data lisimeter)	Tidak berlaku	Triwulanan	Target/laju infiltrasi desain.
		Tingkat-tingkat air; volume air pori dalam timbunan batuan sisa	Tidak berlaku	Bulanan	Tidak berlaku
		Penelitian geofisik (misalnya, elektromagnetik, resistivitas) untuk memetakan konduktivitas di bawah permukaan dan jalur-jalur aliran rembesan	Seperti disyaratkan	Seperti disyaratkan	Tidak berlaku
		Parameter kualitas-air umum (lapangan)	Tidak berlaku	Bulanan	Pedoman kualitas-air Negara Bagian/nasional untuk air tanah. Dasar dan kemiringan naik.
		Jumlah solid tersuspensi, kemasaman/kebasaaan, ion-ion dan ligan-ligan utama, logam/metaloid (laboratorium)	Tidak berlaku	Triwulanan	

Fasilitas	Komponen	Parameter	Frekuensi ^a		Kriteria penilaian kinerja
			Tahap eksplorasi/kelayakan ^b	Tahap operasi	
TSF, bendungan tailing	Bahan-bahan tailing	Laju penggilingan dan produksi tailing, massa/volume yang dipindahkan ke TSF	Pemodelan prediksi-prediksi	Mingguan	Pemodelan data.
		Karakterisasi geokimia (uji statis dan uji kinetik)	Dasar: Seperti disyaratkan	Seperti disyaratkan	Tidak berlaku
	Hidrologi (air supernatan)	Volume, tingkat air, laju aliran tailing ke fasilitas, laju aliran pompa pengurusan, laju aliran spillway	Tidak berlaku	Harian	Tidak berlaku
	Hidrologi (rembesan permukaan)	Laju aliran	Tidak berlaku	Mingguan/bulanan	Tidak berlaku
	Kualitas air (air supernatan dan rembesan permukaan)	Parameter kualitas-air umum (lapangan)	Tidak berlaku	Mingguan	Pedoman kriteria kualitas air spesifik-lokasi (untuk penggunaan di lokasi) atau kualitas air plepasan (misalnya, IFC 2004).
		Jumlah solid tersuspensi, kemasaman/kebasaaan, ion-ion dan ligan-ligan utama, logam/metaloid (laboratorium)	Tidak berlaku	Bulanan	
	Hidrogeologi (air dalam timbunan batuan sisa; air tanah di timbunan lereng atas, bawahnya and lereng bawah TSF)	Tingkat-tingkat air	Dasar	Bulanan	Tidak berlaku
		Penelitian geofisik (misalnya, elektromagnetik, resistivitas) untuk memetakan konduktivitas di bawah permukaan dan jalur-jalur aliran rembesan	Seperti disyaratkan	Seperti disyaratkan	
		Parameter kualitas-air umum (lapangan)	Dasar	Bulanan	Pedoman kualitas-air Negara Bagian/nasional untuk air tanah. Dasar dan kemiringan naik.
	Jumlah solid tersuspensi, kemasaman/kebasaaan, ion-ion dan ligan-ligan utama, logam/metaloid (laboratorium)	Dasar	Triwulanan		
Tailing tak jenuh	Konsentrasi oksigen ruang pori dan suhu (in situ)	Bulanan	Bulanan	Tidak berlaku	

Fasilitas	Komponen	Parameter	Frekuensi ^a		Kriteria penilaian kinerja
			Tahap eksplorasi/kelayakan ^p	Tahap operasi	
Pit-pit/terbuka	Bahan dinding-pit (kuncup depresi air tanah)	Litologi, massa talus/volume bahan yang terpapar pada oksigen	Pemodelan prediksi-prediksi	Seperti disyaratkan	Pemodelan data.
		Karakterisasi geologis litologi (uji statis dan uji kinetik)	Dasar: seperti disyaratkan	Seperti disyaratkan	Tidak berlaku
	Hidrologi pit/air hujan	Laju aliran pompa pengeringan	Tidak berlaku	Harian	Tidak berlaku
	Kualitas air pit	Parameter kualitas-air umum (lapangan)	Tidak berlaku	Mingguan	Pedoman kriteria kualitas air (untuk penggunaan di lokasi) atau kualitas air pelepasan (misalnya, IFC 2004).
Jumlah solid tersuspensi, kemasaman/kebasaaan, ion-ion dan ligan-ligan utama, logam/metaloid (laboratorium)		Tidak berlaku	Bulanan		
Hidrologi pit (kuncup depresi air tanah)	Tingkat ketinggian muka air bawah tanah, laju aliran (misalnya, bor-bor pengeringan)	Parameter kualitas-air umum (lapangan)	Pemodelan prediksi-prediksi	Mingguan	Data pemodelan
		Parameter kualitas-air umum (lapangan)	Dasar	Mingguan	Pedoman kriteria kualitas-air (penggunaan di lokasi) atau kualitas air pelepasan (misalnya, IFC 2004).
		Jumlah solid tersuspensi, kemasaman/kebasaaan, ion-ion dan ligan-ligan utama, logam/metaloid (laboratorium)	Dasar	Bulanan	
Tambang-tambang bawah tanah	Bahan pengeringan (kuncup depresi air tanah)	Massa/volume bahan terpapar pada oksigen	Pemodelan prediksi-prediksi	Bulanan	Data pemodelan
		Karakterisasi geokimia litologi (uji statis dan kinetik)	Dasar: seperti disyaratkan	Seperti disyaratkan	Tidak berlaku
	Hidrogeologi (kuncup depresi air tanah, kualitas air tanah)	Tingkat ketinggian muka air bawah tanah dan laju aliran	Dasar	Mingguan	Tidak berlaku
		(bor-bor pengeringan)	Dasar	Mingguan	Kriteria kualitas air (untuk penggunaan di lokasi) atau pedoman pelepasan air berkualitas
		Parameter kualitas-air umum (lapangan)	Dasar	Bulanan	

Fasilitas	Komponen	Parameter	Frekuensi ^a		Kriteria penilaian kinerja
			Tahap eksplorasi/kelayakan ^b	Tahap operasi	
Tumpukan dan timbunan buangan pelindian	Bahan bijih	Laju produksi bijih, massa/volume bijih dalam bantalan pelindian	Pemodelan prediksi-prediksi	Harian	Data pemodelan.
		Karakterisasi geokimia litologi (uji statis dan kinetic)	Dasar: seperti disyaratkan	Seperti disyaratkan	Tidak berlaku
	Hidrologi (limpasan air permukaan dan rembesan permukaan)	Laju aliran	Tidak berlaku	Harian	Tidak berlaku
	Kualitas air (limpasan air permukaan dan rembesan permukaan)	Parameter kualitas-air umum (lapangan)	Tidak berlaku	Mingguan	Kriteria kualitas-air (untuk penggunaan di lokasi). Kualitas air terprediksi.
		Jumlah solid tersuspensi, kemasaman/kebasaaan, ion-ion dan ligan-ligan utama, logam/metaloid (laboratorium)	Tidak berlaku	Bulanan	
	Hidrogeologi (air dalam timbunan batuan sisa; air tanah di timbunan lereng atas, bawahnya and lereng bawah dari bantalan timbunan pelindian/ tumpukan pelindian)	Tingkat ketinggian muka air bawah tanah	Dasar	Mingguan	Tidak berlaku
		Survei geofisik (misalnya elektromagnetik) untuk memetakan aliran di bawah permukaan	Seperti disyaratkan	Seperti disyaratkan	Tidak berlaku
		Parameter umum kualitas air (lapangan)	Dasar	Mingguan	Pedoman kualitas-air Negara Bagian/nasional untuk air tanah. Dasar dan kemiringan naik.
		Jumlah solid tersuspensi, kemasaman/kebasaaan, ion-ion dan ligan-ligan utama, logam/metaloid (laboratorium)	Dasar	Bulanan	
	Timbunan sulfida (akhir masa hidup)	Konsentrasi ruang-pori oksigen dan suhu (in situ)	Bulanan	Bulanan	Tidak berlaku
Fasilitas lain	Hidrologi (penyimpanan air, cekungan sedimen, dll.)	Laju aliran	Tidak berlaku	Tergantung peristiwa: seperti disyaratkan	Tidak berlaku
	Kualitas air (penyimpanan air, cekungan sedimen)	Parameter kualitas-air umum (lapangan)	Tidak berlaku	Tergantung peristiwa: seperti disyaratkan	Pedoman kriteria kualitas-air (penggunaan di lokasi) atau kualitas air pelepasan (misalnya, IFC 2004).
		Jumlah solid tersuspensi, kemasaman/kebasaaan, ion-ion dan ligan-ligan utama, logam/metaloid (laboratorium)	Tidak berlaku		
	Limpasan jalan/ kualitas air rembesan permukaan (misalnya, jalan-jalan jarak jauh, jalan-jalan eksplorasi)	Parameter umum kualitas air (lapangan)	Tidak berlaku	Tergantung peristiwa: seperti disyaratkan	
Jumlah solid tersuspensi, kemasaman/kebasaaan, ion-ion dan ligan-ligan utama, logam/metaloid (laboratorium)		Tidak berlaku			

Tidak berlaku

^a Frekuensi pemantauan untuk beberapa lokasi mungkin perlu lebih sering di musim hujan (dan periode arus-deras) dan lebih jarang di musim panas (dan arus-lemah). Frekuensi yang lebih sering juga diperlukan sebelum/selama pelepasan ke luar lokasi (misalnya dalam kasus pemantauan air permukaan hilir).

^b Frekuensi pemantauan selama tahap eksplorasi/kelayakan akan tergantung pada waktu yang diharapkan sebelum dimulainya operasi.

^c DIIS (2016g).

^d MCA (1997).

GLOSSARY

ABATES	Satu piranti lunak untuk membantu pengelolaan kualitas air lokasi tambang. Piranti ini dikembangkan untuk membantu perusahaan pertambangan dengan neraca asam-basa (acid-base accounting) dan pengkajian kualitas air. Dapat diunduh gratis di situs Earth Systems. ⁷⁷
ADTI	Acid Drainage Technology Initiative atau Prakarsa Teknologi Drainase Asam. ⁷⁸
AMD (DAL)	Acid and Metalliferous Drainage (AMD) atau Drainase Asam dan Logam (DAL) (lihat definisi terperinci di Bagian 2.1).
AMDTreat	Satu perangkat lunak yang dapat digunakan untuk memprediksi dan membuat model biaya perlakuan DAL. Perangkat lunak ini menyediakan berbagai pilihan perlakuan baik untuk sistem perlakuan pasif maupun aktif. Dapat diunduh gratis. ⁷⁹
AMIRA	AMIRA International Limited. ⁸⁰
ANC	Acid Neutralising Capacity atau Kapasitas Penetralan Asam, dinyatakan sebagai kg setara H ₂ SO ₄ per ton.
ANSTO	Australian Nuclear Science and Technology Organisation atau Organisasi Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir Australia.
APP	Acid Producing Potential atau Potensi Produksi Asam, dinyatakan sebagai kg H ₂ SO ₄ per ton. Juga disebut Potensi Menghasilkan Asam (AGP).
Asam (Acid)	Satu ukuran konsentrasi ion hidrogen (H ⁺); umumnya dinyatakan sebagai pH. Asam tidak setara dengan kemasaman atau acidity (<i>lihat definisi di bawah</i>).
Bahan berpotensi membentuk asam (PAF)	Bahan yang diidentifikasi dengan hasil-hasil uji statis dan kinetik.
Batuan sisa tambang	Bahan seperti tanah, batuan yang tidak mengandung mineral atau telah dimineralisasi, yang mengelilingi mineral atau tubuh bijih tambang batubara dan arus disingkirkan untuk menambang bijih tambang tersebut. Ini umumnya disebut batuan sisa pada tambang logam besi atau overburden, interburden, lapisan mineral atau limbah di tambang batubara.
Bendungan tailing (Tailings dam)	Fasilitas yang dirancang untuk menyimpan bahan tailing jenuh dan air supernatant yang dihasilkan pada saat pengolahan bijih tambang. Tidak seperti fasilitas penyimpanan tailing, bendungan tailing dirancang sebagai struktur penahan air yang kompeten.

77 <http://www.earthsystems.com.au/tools.htm>.

78 <http://www.unr.edu/mines/adti/>.

79 <http://www.amdtreat.osmre.gov>.

80 <http://www.amira.com.au>.

Dewan International Pertambangan dan Logam (ICMM)	Didirikan pada tahun 2001 guna meningkatkan kinerja pengembangan keberlanjutan di bidang industri pertambangan dan logam. ⁸¹
Dewan Mineral Australia (MCA)	Lembaga puncak industri Australia di bidang eksplorasi, industri pertambangan dan pemrosesan mineral. ⁸²
Dinding penahan patahan dengan posisi di atas	Untuk patahan, blok diposisikan di atas patahan tersebut.
Dinding penahan patahan dengan posisi di bawah	Untuk patahan, blok diposisikan di bawah patahan tersebut.
Domain, wilayah penuh	Unit-unit pengelolaan lahan dalam lokasi tambang, biasanya dengan karakteristik geofisik yang mirip, seperti lubang tambang, WRD, TSF, daerah pemrosesan, timbunan cadangan bijih.
Drainase asam (Acid drainage)	Bentuk dari Drainase Asam dan Logam (DAL), dikarakterisasikan dengan pH yang rendah, konsentrasi logam beracun yang meningkat, konsentrasi sulfat yang tinggi dan salinitas yang tinggi.
Drainase logam (Metalliferous drainage)	Bentuk dari Drainase Asam dan Logam (DAL), dikarakterisasikan dengan pH hampir netral, konsentrasi logam berat yang meningkat, salinitas sulfat yang tinggi.
Drainase salin (Saline drainage)	Produk dari Drainase asam dan Logam Besi (DAL), ditandai dengan salinitas sulfat yang tinggi, namun dengan pH yang hampir netral dan konsentrasi logam berat yang rendah.
Fasilitas penyimpanan tailing (Tailings storage facility)	Suatu areal yang digunakan untuk diisi tailing tidak jenuh yang dihasilkan dari pemrosesan bijih. Tidak seperti bendungan tailing, TSF tidak sesuai untuk digunakan sebagai penyimpanan air supernatan
Jaringan Kerja Internasional untuk Pencegahan Asam (INAP)	Suatu konsortium mitra industri pertambangan yang berfokus pada peningkatan manajemen AMD-penghasil limbah. ⁸³
Jeda waktu (Lag time)	Waktu tunda antara gangguan atau paparan bahan pembentuk asam dan permulaan timbulnya drainase asam.
Kandungan kemasaman (Acidity load)	Produk dari kemasaman dan laju aliran, umumnya dinyatakan sebagai massa setara CaCO ₃ per unit waktu.
Kemasaman (Acidity)	Ukuran konsentrasi ion hidrogen (H ⁺) dan kemasaman (laten) mineral; umumnya

81 <http://www.icmm.com>.

82 <http://www.minerals.org.au>.

83 <http://www.inap.com.au/>.

dinyatakan setara dengan mg/L CaCO₃. Diukur dengan titrasi di laboratorium atau diukur dari pH dan data kualitas air.

Klorit	(Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ •(Mg,Fe) ₃ (OH) ₆ —anggota keluarga phyllosilicate mineral.
Korporasi Keuangan Internasional (IFC)	Anggota Kelompok World Bank; lembaga pengembangan terbesar di dunia yang berfokus khususnya pada sektor swasta di negara-negara berkembang ⁸⁴
Lapisan penutup air	Lapisan air permukaan (misalnya pada fasilitas penyimpanan tailing atau pit) atau air tanah (misalnya di pit urukan) yang ditujukan untuk membatasi masuknya oksigen ke dalam bahan penghasil DAL.
Lapisan penutup alkalin (Alkaline cover)	Lapisan tanah penutup, seperti lapisan penutup penetesan air atau simpan dan lepas, yang memiliki komponen 'pembentuk alkalinitas tersebar di atas, dalam atau di dasar lapisan penutup. Tujuannya untuk meminimalkan infiltrasi dan memastikan bahwa air yang bermigrasi melalui lapisan penutup mengandung alkalinitas yang cukup besar.
Lapisan penutup simpan/lepas (Store/release cover)	Satu lapisan tanah penutup yang bervegetasi dan tidak bersifat menepis (non-shedding), yang ditujukan untuk meminimalisir perkolasi yang melaluinya dengan melepaskan curah hujan musiman yang tersimpan lewatevapo-transpirasi selama musim kering.
Lapisan tanah penutup (Soil cover)	Satu atau lebih lapisan dari bahan menyerupai tanah yang ditujukan untuk membatasi perkolasi curah hujan atau masuknya oksigen atau keduanya ke dalam bahan penghasil DAL.
Litologi (Lithology)	Deskripsi karakteristik fisik batuan yang terlihat pada saat singkapan, pada saat dipegang atau sampel inti atau dengan pembesaran rendah, seperti warna, tekstur, ukuran butiran dan komposisi.
Materi sisa pelindian bijih tambang (Heap leach spent ore)	Materi yang tersisa setelah pengambilan logam dan beberapa bahan terlarut melalui proses pelindian timbunan dan pembilasan bijih tambang (MMSD 2002).
Model blok (Block model)	Model tiga dimensi penyebaran bijih tambang dan bahan limbah dengan berbagai properti geokimia (tambang logam besi). Lihat juga ' <i>model kisi/lapisan</i> '.
Model kisi/lapisan (Grid/layer model)	Model dua dimensi penyebaran bijih tambang dan bahan limbah dengan berbagai properti geokimia (tambang batubara). Lihat juga ' <i>model blok</i> '.
Muscovite	KAl ₂ (AlSi ₃)O ₁₀ (OH) ₂ —anggota kelompok mica dari keluarga mineral phyllosilicate.
Neraca Asam Basa (Acid-Base Account)	Neraca Asam-Basa mengevaluasi keseimbangan antara proses pembentukan asam (oksidasi mineral sulfida) dan proses penetralan asam. Ini dapat melibatkan penentuan potensi kemasaman maksimal (APP/ maximum potential acidity) dan kapasitas penetral-asam yang melekat (ANC), keduanya didefinisikan di bawah.

⁸⁴ <http://www.ifc.org>.

Neraca kandungan kemasaman	Neraca kandungan kemasaman untuk lokasi tambang mempertimbangkan volume dan laju aliran air serta kemasaman (lihat definisi di atas), dan menggabungkan seluruh fasilitas tambang yang merupakan sumber potensi DAL, misalnya, timbunan batuan sisa, timbunan bijih tambang, fasilitas penyimpanan tailing, pit, pekerjaan bawah tanah, areal timbunan pelindian dan bahan konstruksi tambang.
NEPM	National Environment Protection Measure (Tindakan Perlindungan Lingkungan Nasional).
NPI	National Pollutant Inventory (Inventori Polutan Nasional).
Rekayasa geokimia	Rekayasa menggunakan geokimia untuk berkontribusi pada elemen desain kunci aspek-aspek batu limbah (misalnya, campuran batu kapur dan kadar air yang optimal dari lapisan untuk meminimalkan tingkat oksidasi sulfida).
PADRE	Partnership for Acid Drainage Remediation in Europe atau Kemitraan bagi Remediasi Drainase Asam di Eropa. ⁸⁵
Pedoman GARD	Pedoman Drainase Batu Asam Global (GARD) (2009). ⁸⁶
Pembuangan bersamaan (Co-disposal)	Kombinasi pembuangan sungai limbah butiran kasar (limbah/sisa) dan butiran halus (tailing); digunakan secara luas di industri batubara Australia.
Penampung batuan sisa tambang (WRD)	Fasilitas yang dibangun untuk menampung batuan sisa tambang.
Pencampuran (Blending)	Pencampuran limbah tambang yang berpotensi menghasilkan asam dengan bahan alkalin, sehingga membentuk bahan gabungan di mana asam yang dibentuk setidaknya dikonsumsi di tempat oleh bahan alkalin di sekitarnya.
Penilaian dampak lingkungan	Dalam buku pegangan ini, juga mengacu pada analisis dampak lingkungan (EIS), pernyataan pengaruh pada lingkungan, dsb.
Perlakuan aktif (Active treatment)	Proses di mana zat kimia atau bahan alami ditambahkan ke DAL untuk memperbaiki kualitas air. Pengendalian operator dapat bervariasi dari perlakuan kumpulan yang relatif sederhana hingga fasilitas perlakuan terkomputerisasi dengan berbagai zat aditif dan proses pemantauan dan pengendalian yang terperinci. ⁸⁷ Perlakuan aktif melibatkan reagen dan input tenaga kerja secara teratur untuk operasi yang berkelanjutan, dibandingkan dengan perlakuan pasif (lihat di bawah) yang hanya membutuhkan pemeliharaan sewaktu-waktu. Sistem perlakuan aktif dapat direkayasa untuk menghadapi berbagai kemasaman, laju aliran dan kandungan kemasaman.
Perlakuan pasif (Passive treatment)	Sistem perlakuan pasif paling cocok bagi DAL dengan Kemasaman rendah (<800 mg CaCO ₃ /L), laju aliran rendah (<50 L/s) dan oleh karenanya Muatan Asam rendah (<100-150 kg CaCO ₃ /day). Lihat juga ' <i>perlakuan aktif</i> '.

85 <http://www.padre.imwa.info/>.

86 <http://www.gardguide.com/images/5/5f/TheGlobalAcidRockDrainageGuide.pdf>.

87 <http://www.inap.com.au>.

Perubahan batuan berpori (Phyllic)	Perubahan zona pada batuan berpori yang telah terpengaruh oleh sirkulasi cairan hidrotermal. Biasanya terlihat pada deposit bijih tembaga porfiri di batu-batuan bersifat alkali. Ditandai oleh kumpulan kuarsa + serisit + pirit.
Potensi Produksi Asam Neto (NAPP)	Net Acid Producing Potential atau Potensi Produksi Asam Neto, dinyatakan sebagai kg H ₂ SO ₄ per ton. Dihitung dengan mengurangi kapasitas penetral asam (ANC) dari potensi produksi asam (APP).
PPG	Prakarsa Pelaporan Global . ⁸⁸
Prinsip pencegahan (Precautionary principle)	Prinsip ini menetapkan bahwa bila bukti ilmu pengetahuan tidak pasti, pengambil keputusan harus mengambil tindakan untuk membatasi kerusakan lingkungan yang berlanjut dan harus berhati-hati dalam mengevaluasi proposal yang memiliki potensi untuk berdampak serius terhadap lingkungan atau tidak dapat diubah. Lihat UU Perlindungan Lingkungan dan Cagar Alam Keanekaragaman Hayati (UU EPBC), daftar 3.
Program Drainase Netral Lingkungan Pertambangan (MEND)	Program yang didanai oleh Pemerintah Kanada dan mitra-mitra industrinya. ⁸⁹
Tailing (Tailings)	Suatu gabungan bahan padat berbutiran halus yang tersisa setelah logam dan mineral diekstraksi dari bijih tambang yang dihancurkan dan dihaluskan, serta air hasil pengolahan yang tersisa. Kira-kira 98% bahan yang ditambang untuk diproses pada tambang dibuang sebagai tailing. Di tambang batubara, tailing meliputi buangan kasar dan halus dari pencucian batubara.
Timbunan bijih tambang kandungan rendah (Low grade ore stockpile)	Bahan yang telah ditambang dan ditimbun, dengan nilai yang memadai untuk menjamin pemrosesan, baik pada saat dicampur dengan batuan berperingkat tinggi atau setelah bijih tambang berperingkat tinggi habis, namun sering kali ditinggalkan sebagai 'limbah' pada saat habisnya masa operasi tambang.
Uji kinetik (Kinetic test)	Prosedur yang digunakan untuk mengukur besarnya dan/atau efek proses dinamis, termasuk reaksi (seperti oksidasi sulfida dan pembentukan asam), perubahan bahan dan aliran zat kimia serta kandungan hasil perusakan iklim. Tidak seperti uji statik, uji kinetik mengukur perilaku sampel dari waktu ke waktu.
Uji Pembentukan Asam Neto (NAG)	Net Acid Generation test atau uji Pembentukan Asam Neto, juga disebut sebagai 'uji NAG penambahan tunggal'. Peroksida digunakan untuk mengoksidasi sulfida pada sampel, kemudian asam yang dibentuk selama oksidasi mungkin dikonsumsi secara parsial atau keseluruhan oleh komponen penetral pada sampel. Kemasaman yang tersisa ditunjukkan sebagai kg H ₂ SO ₄ per ton. 'uji NAG berurutan' melibatkan serangkaian uji NAG pada sampel. Ini mungkin dibutuhkan bila sampel tidak dapat dioksidasi penuh dengan menggunakan uji NAG biasa.

⁸⁸ <http://www.globalreporting.org/Home>.

⁸⁹ http://www.nrcan.gc.ca/ms/canmet-mtb/mmsl-lmsm/mend/default_e.htm.

Uji statis

Prosedur untuk menandai karakteristik fisik, kimia atau biologi dari sampel pada suatu waktu. Mencakup pengukuran mineral, komposisi kimia dan analisi yang diperlukan untuk pelaporan asam basa.

*UU Perlindungan
Lingkungan dan
Cagar Alam
Keanekaragaman
Hayati th. 1999
(EPBC Act)*

Undang-undang utama lingkungan dari Pemerintah Australia. UU ini memberikan kerangka kerja hukum untuk melindungi dan mengelola flora dan fauna yang penting, komunitas ekologi dan tempat-tempat warisan pada skala nasional dan internasional—sebagaimana didefinisikan dalam EPBC Act sebagai permasalahan penting lingkungan nasional.⁹⁰

⁹⁰ <http://www.environment.gov.au/epbc>.

REFERENCES

- ACARP (Australian Coal Industry Research Program) (2008). 'Development of ARD assessment for coal process wastes', ACARP Project C15034, report prepared by Environmental Geochemistry International and Levay and Co. Environmental Services, ACeSSS University of South Australia, July 2008.
- Ahern, CR, O'Brien, LE, Dobos, SK, McElnea, AE, Moore, NG, Watling, KM (2014). *Queensland acid sulphate soil technical manual: soil management guidelines*, Department of Science, Information Technology, Innovation and the Arts, Queensland Government, Brisbane.
- AMIRA (2002). *ARD Test Handbook: Project P387A: Prediction and kinetic control of acid mine drainage*. AMIRA International Limited, Melbourne, Australia. www.amira.com.au/documents/downloads/P387AProtocolBooklet.pdf.
- Amos, R, Blowes, D, Bailey, B, Segó, D, Smith, L, Ritchie, A (2015). 'Waste-rock hydrogeology and geochemistry', *Applied Geochemistry*, 57, 140–156.
- Anderson, ME, Scharer, JM, Nicholson, RV (1999). 'The oxygen consumption method (OCM): a new technique for quantifying sulfide oxidation rates in waste rock', in D Goldsack, N Belzile, P Yearwood, G Hall (eds) *Proceedings: Mining and the Environment II*. September 1999, Sudbury, Canada, pp 1133-1142.
- Andrina, J (2009). 'Physical and geochemical behaviour of mine rock stockpiles in high rainfall environments', PhD thesis, University of British Columbia, Vancouver, October 2009, 455 pp.
- Andrina, J, Miller, S, Neale, A (2003). 'The design, construction, instrumentation and performance of a full-scale overburden stockpile trial for mitigation of acid rock drainage, Grasberg Mine, Papua Province, Indonesia', in T Farrell, G Taylor (eds), *Proceedings of the Sixth International Conference on Acid Rock Drainage*, Cairns, Australia, 14–17 July 2003, 123–132.
- Andrina, J, Wilson, GW, Miller, SD (2012). 'Waste rock kinetic testing program: assessment of the scale up factor for sulfate and metal release rates', in WA Price, C Hogan, G Tremblay (eds), *Proceedings of the Ninth International Conference on Acid Rock Drainage*, Ottawa, Canada, 20–26 May 2012, 12 pp.
- ANZECC–ARMCANZ (Australian and New Zealand Environment and Conservation Council and Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand) (2000a). *Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality*, National Water Quality Management Strategy Paper no. 4, ANZECC–ARMCANZ, Canberra, 1,500 pp.
- ANZECC–ARMCANZ (Australian and New Zealand Environment and Conservation Council and Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand) (2000b). *Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality: volume 1: the guidelines*, chapters 1–7, ANZECC and ARMCANZ, Canberra.
- ANZECC–ARMCANZ (Australian and New Zealand Environment and Conservation Council and Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand) (2000c). *Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality: volume 3: primary Industries: rationale and background information*, ANZECC and ARMCANZ, Canberra.

Australian Standards (2008). 'AS 4969.7-2008: Analysis of acid sulfate soil: dried samples: methods of test: method 7: determination of chromium reducible sulfur (Scr)', Standards Australia, June.

Batley, GE, Humphrey, CL, Apte, AC, Stauber, JL (2003). *A guide to the application of the ANZECC/ARMCANZ water quality guidelines in the minerals industry*, ACMER, Brisbane.

Bennett, JW, Askraba, S, Mackenzie, P (2005). 'A new method to characterize black shales in Pilbara iron mining operations', in Conference Proceedings: Iron Ore Conference, 19–21 September 2005. Fremantle, WA.

Blowes, DW, Frind EO (2003). 'Advances in reactive-transport modelling of contaminant release and attenuation from mine-waste deposits', in Jambor, JL, Blowes, DW, Ritchie, AIM (eds.), *Environmental aspects of mine wastes*, Mineralogical Association of Canada short course series, vol. 31, ISBN 0-921294-31-x, pp. 283–302, www.mineralogicalassociation.ca.

Blowes, DW, Jambor, JL (eds) (1994). *The environmental geochemistry of sulfide mine-wastes: short course handbook*, vol. 22, May, Waterloo, Ontario.

Blowes, DW, Jambor, JL, Ritchie, AIM (eds) (2003). *Environmental aspects of mine wastes: short course*, vol. 31, Mineral Association of Canada, Vancouver, British Columbia.

Blowes, D, Moncur, M, Smith, L, Segó, D, Bennett, J, Garvie, A, Linklater, C, Gould, D, Reinson, J (2006). 'Construction of two large-scale waste rock piles in a continuous permafrost region', in Barnhisel, RI (ed.), *Proceedings of the Seventh International Conference on Acid Rock Drainage* (pp. 187–199), St Louis, Missouri, American Society of Mining and Reclamation.

Bourgeot, N, Piccinin, R, Taylor, J (2011). 'The benefits of kinetic testwork using oxygen consumption techniques and implications for the management of sulfidic materials', in Bell, LC, Braddock, B (eds), *Proceedings of the Seventh Australian Workshop on Acid and Metalliferous Drainage* (p. 117), 21–24 June 2011, Darwin.

Bratty, M, Lawrence, R, Kratochvil, D, Marchant, B (2006). 'Applications of biological H₂S production from elemental sulfur in the treatment of heavy metal pollution including acid rock drainage', in Barnhisel, RI (ed.), *Proceedings 7th International Conference on Acid Rock Drainage* (pp. 271–281), St Louis, Missouri, 26–30 March 2006, American Society of Mining and Reclamation, Lexington, Kentucky.

Brown, PL, Wickham, MP, Waples, JS, Stevens, CR, Payne, KL, Vinton, BG, Logsdon, M (2009). 'Estimation of long-term lime demand for remediation of ARD-contaminated groundwater at the Bingham Canyon Mine, Utah, USA', in *Proceedings: Securing the Future and 8th International Conference on Acid Rock Drainage* (p. 10), 22–26 June 2009, Skelleftea, Sweden.

Bussière, B (2007). 'Acid mine drainage: mechanisms, prediction, control and treatment', Industrial CRSNG Polytechnique Chair, University of Quebec (UQAT), Environment and Mine Waste Management, unpublished presentation at La Mine Doyon, May 2007.

Byrne, G (2013). 'Long-term water management: the forgotten legacy of mine closure', in *Water in mining 2013: Proceedings* (pp. 163–168), Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne.

CAO (Office of the Compliance Advisor/Ombudsman) (2008). *Participatory water monitoring: a guide for preventing and managing conflict*, CAO, International Finance Corporation, Washington DC, <http://www.cao-ombudsman.org/howwework/advisor/documents/watermoneng.pdf>.

Castendyk, DN, Eary, LT (2009). *Mine pit lakes: characteristics, predictive modeling, and sustainability*, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Colorado, 312 pp.

- Catalan, LJ, Yanful, EK (2002). 'Sediment-trap measurement of suspended mine tailings in shallow water cover', *Journal of Environmental Engineering*, 128(1):19–30.
- Ciccarelli, JM, Weber, PA, Stewart, WS, Li, J, Schumann, R, Miller, SD, Smart, RStC (2009). 'Estimation of long-term silicate neutralisation of acid rock drainage', in *8th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD) and Securing the Future: Mining, metals and the environment in a sustainable society 2009*, proceedings of a meeting held 22–26 June 2009, Skelleftea, Sweden, 11 pp.
- Coastech Research (1989). *Investigation of prediction techniques for acid mine drainage*, MEND project report 1.16.1a, MEND, Ottawa, Ontario.
- Dagenais, AM, Aubertin, M, Bussière, B (2006). 'Parametric study on the water content profiles and oxidation rates in nearly saturated tailings above the water table', in Barnhisel, RI (ed.), *Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)* (pp. 405–420), 26–30 March 2006, St Louis, Missouri, American Society of Mining and Reclamation, Lexington, Kentucky.
- Davis, B, Bourgeot, N, Taylor, J (2014). 'Using kinetic geochemical testwork to assist with mine planning, operations and post closure', in Miller, H, Preuss, L (eds), *Proceedings of the Eighth Australian Workshop on Acid and Metalliferous Drainage*, 29 April – 2 May 2014, Adelaide, pp. 281.
- DIIS (Department of Industry, Innovation and Science) (2016a). *Mine closure*, DIIS, Canberra.
- DIIS (Department of Industry, Innovation and Science) (2016b). *Community engagement and development*, DIIS, Canberra.
- DIIS (Department of Industry, Innovation and Science) (2016c). *Evaluating performance: monitoring and auditing*, DIIS, Canberra.
- DIIS (Department of Industry, Innovation and Science) (2016d). *Working with Indigenous communities*, DIIS, Canberra.
- DIIS (Department of Industry, Innovation and Science) (2016e). *Tailings management*, DIIS, Canberra.
- DIIS (Department of Industry, Innovation and Science) (2016f). *Risk management*, DIIS, Canberra.
- DIIS (Department of Industry, Innovation and Science) (2016g). *Water stewardship*, DIIS, Canberra.
- DMP-EPA (Western Australian Department of Mines and Petroleum and Western Australian Environmental Protection Authority) (2015). *Guidelines for preparing mine closure plans*, May 2015, DMP and EPA, Perth.
- Dobos, SK (2005). 'Acid sulfate soils (ASS) and acid mine drainage (AMD): framboids and the common links', in Bell, LC, McLean, RW (eds), *Proceedings of the Fifth Australian Workshop on Acid Drainage* (pp. 71–84), Fremantle, Western Australia, 29–31 August 2005, Australian Centre for Minerals Extension and Research, Brisbane.
- Dowd (2005). 'The business case for prevention of acid drainage', in Bell, CL, McLean, RW (eds), *Proceedings of the Fifth Australian Workshop on Acid Mine Drainage* (pp. 1–10), Fremantle, Western Australia, 29–31 August 2005, Australian Centre for Minerals Extension and Research, Brisbane.
- Downing, BW, Giroux, G (2014). 'Block modeling and acid rock drainage prediction', in Jacobs, JA, Lehr, JH, Testa, SM (eds), *Acid mine drainage, rock drainage, and acid sulfate soils: causes, assessment, prediction, prevention, and remediation* (Chapter 23), John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 10.1002/9781118749197.
- DRET (Department of Resources, Energy and Tourism) (2008). *Cyanide management*, DRET, Canberra.

DRET (Department of Resources, Energy and Tourism) (2012). *Social responsibility in the mining and metals sector in developing countries*, DRET, Canberra, <http://www.industry.gov.au/resource/Documents/LPSDP/DEPRES.pdf>.

Duckett, R, O'Kane, M (2006). 'Hydraulic placement of a dry cover system: design and performance monitoring of the Kennecott Ridgeway mine tailings dam cover system', in Barnhisel, RI (ed.), *Proceedings of the Seventh International Conference on Acid Rock Drainage* (pp. 539-554), 26-30 March 2006, St Louis, Missouri, American Society of Mining and Reclamation, Lexington, Kentucky.

EHP (Queensland Department of Environment and Heritage Protection) (2013). *Operational policy: mining: release of mine-affected water under enhanced Environmental Authority conditions and management of cumulative impacts in the Fitzroy Basin*, EHP, Brisbane.

Environment Australia (1997). *Managing sulfidic mine wastes and acid drainage: best practice environmental management in mining*, Environment Australia, Canberra.

Espinoza, D, Morris, JWF (2013). 'Decoupled NPV: a simple, improved method to value infrastructure investments', *Construction Management and Economics*, 31:471-496.

Fisher, TSR, Lawrence, GA (2006). 'Treatment of acid rock drainage in a meromictic mine pit lake', *Journal of Environmental Engineering*, 132:515-526.

Franks, DM, Brereton, D, Moran, CJ, Sarker, T, Cohen, T (2010). *Cumulative impacts: a good practice guide for the Australian coal mining industry*, Australian Coal Association Research Program, Centre for Social Responsibility in Mining and Centre for Water in the Minerals Industry, Sustainable Minerals Institute, University of Queensland, Brisbane, www.csr.uq.edu.au/docs/CSRM%20SMI%20Good%20Practice%20Guide%20document%20LR.PDF.

GARD Guide. *The global acid rock drainage guide*, International Network for Acid Prevention, <http://www.gardguide.com/images/5/5f/TheGlobalAcidRockDrainageGuide.pdf>.

Garvie, AM, Taylor, GF (2000). *Manual of techniques to quantify processes associated with polluted effluent from sulfidic wastes*, Australian Centre for Mining Environmental Research.

Geller, W, Schultze, M (2013). 'Remediation and management of acidified pit lakes and outflowing waters', in Geller, W, Schultze, M, Kleinmann, RLP, Wolkersdorfer, C (eds), *Acidic pit lakes: legacies of surface mining on coal and metal ores* (pp. 225-264), Springer, Berlin.

Geller, W, Schultze, M, Kleinmann, RLP, Wolkersdorfer, C (2013). *Acidic pit lakes: legacies of surface mining on coal and metal ores*, Springer, Berlin.

Gilbert, SE, Cooke, DR, Hollings, P (2003). 'The effects of hardpan layers on the water chemistry from leaching of pyrrhotite-rich tailings materials', *Environmental Geology*, 44:687-697.

Government of British Columbia (2015). *Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel: report on Mount Polley tailings storage facility breach*, 30 January, British Columbia.

Green, R, Borden, RK (2011). 'Geochemical risk assessment process for Rio Tinto's Pilbara iron ore mines', in Kumar, S (ed.), *Integrated waste management*, volume 1, DOI: 10.5772/20473, www.intechopen.com.

Hannam, S, Green, R (2014). *RTIO AMPL Risk Assessment Tool*, 8th Australian Workshop on Acid and Metalliferous Drainage, Adelaide, Australia. 28 April - 2 May 2014.

Hanton-Fong, CJ, Blowes, DW, Stuparyk, RA (1997). 'Evaluation of low sulfur tailings in the prevention of acid mine drainage', in *Proceedings: 4th International Conference Acid Rock Drainage* (pp. 835-851), 31 May - 16 June 1997, Vancouver, Canada.

- Harries, J, Ritchie, AIM (1985). 'Pore gas composition in waste rock dumps undergoing pyritic oxidation, *Soil Science*, 140:143-152.
- Hutchinson, BJ, Brett, D (2006). 'Savage River Mine: practical remediation works', in Barnhisel, RI (ed.), *Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)* (pp. 810-819), 26-30 March 2006, St Louis, Missouri, American Society of Mining and Reclamation, Lexington, Kentucky.
- ICMM (International Council on Mining and Metals) (2008). *Sustainable development framework: a sustained commitment to improved industry performance*, ICCM, London.
- ICMM (International Council on Mining and Metals) (2009). *Working together: how large-scale mining can engage with artisanal and small-scale miners*, ICMM, London, <http://www.icmm.com/document/789>.
- ICMM (International Council on Mining and Metals) (2015). *A practical guide to catchment-based water management for the mining and metals industry*, ICMM, London, <http://www.icmm.com/document/8329>.
- IFC (International Finance Corporation) (2007). *Environmental health, and safety guidelines for mining*, IFC, Washington DC, <http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/1f4dc28048855af4879cd76a6515bb18/Final%2B-%2BMining.pdf?MOD=AJPERES&id=1323153264157>.
- IFC (International Finance Corporation) (2013). *Good practice handbook: cumulative impact assessment and management guidance for the private sector in emerging markets*, IFC, Washington DC, http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/3aebf50041c11f8383ba8700caa2aa08/IFC_GoodPracticeHandbook_CumulativelmpactAssessment.pdf?MOD=AJPERES.
- INAP (International Network for Acid Prevention) (2009). *The global acid rock drainage guide*, INAP, <http://www.gardguide.com>.
- Jones, DR (2011). 'Report on the 8th International Conference on Acid Rock Drainage, Skelleftea, Sweden', in Bell, LC, Braddock, B (eds), *Proceedings of the Seventh Australian Workshop on Acid and Metalliferous Drainage*, 21-24 June 2011, Darwin, Northern Territory, JKTech Pty Ltd, Brisbane.
- Jones, DR, Taylor, J (2008). 'From concept to best practice: innovations in AMD prevention and management', in Bell, LC, Barrie, BMD, Braddock, B, McLean, RW (eds), *Proceedings of the Sixth Australian Workshop on Acid and Metalliferous Drainage* (pp. 299-320), 15-18 April 2008, Burnie, Tasmania, Australian Centre for Minerals Extension and Research, Brisbane.
- Kuipers, JR, Maest, AS, MacHardy, KA, Lawson, G (2006). *Comparison of predicted and actual water quality at hardrock mines: the reliability of predictions in environmental impact statements*, Kuipers & Associates and Buka Environmental, https://www.earthworksaction.org/library/detail/comparison_of_predicted_and_actual_water_quality_at_hardrock_mines/#.VfpWpmsw-P8.
- Kumar, RN, McCullough, CD, Lund, MA (2013). 'Pit lakes in Australia', in Geller, W, Schultze, M, Kleinmann, RLP, Wolkersdorfer, C (eds), *Acidic pit lakes: legacies of surface mining on coal and metal ores* (pp. 342-361), Springer, Berlin.
- Landers, M, Usher, B (2015). 'Management of spontaneous combustion for metalliferous mines', in *Proceedings: 10th International Conference on Acid Rock Drainage and IMWA 2015* (Chapter 2), 28 April - 1 May 2015, Santiago, Chile.
- Laurence, DC (2006). 'Why do mines close?', in Fourie, A, Tibbett, M (eds), *Mine closure 2006* (pp. 83-94), Proceedings of the First International Seminar on Mine Closure, 13-15 September 2006, Perth, Australian Centre for Geomechanics, Perth.

- Linklater, CM, Sinclair, DJ, Brown, PL (2005). 'Coupled chemistry and transport modelling of sulfidic waste rock dumps at the Aitik mine site', *Applied Geochemistry*, Sweden, 20:275–293, www.sciencedirect.com.
- Linklater, CM, Bennett, JW, Edwards, N (2006). 'Modelling an innovative waste rock dump design for the control of acid rock drainage at the Svartliden gold mine, northern Sweden', in Barnhisel, RI (ed.), *Proceedings of the Seventh International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)* (pp. 1,079–1,105), St Louis, Missouri, American Society of Mining and Reclamation.
- Logsdon, M (2013). 'What does "perpetual" management and treatment mean? Toward a framework for determining an appropriate period-of-performance for management of reactive, sulfide-bearing mine wastes, reliable mine water technology', in Brown, A, Figueroa, L, Wolkersdorfe, C (eds), *Proceedings of the International Mine Water Association Annual Conference 2013*, Golden, Colorado, vol. 1, pp. 53–58.
- Longo, S, Wilson, W (2007). 'Paste rock: part of the future for mine waste management?', *Canadian Mining Journal*, 128:24.
- Lorax Environmental (2003). *Treatment of sulphate in mine effluents*, International Network for Acid Prevention, 129 pp.
- Ludgate I, Coggan A & Davé NK (2003). 'Performance of shallow covers on pyritic uranium tailings', in *Proceedings of the Sixth International Conference on Acid Rock Drainage* (pp. 287–296), 12–18 July 2003, Cairns, QLD, Australia.
- Martin, V, Aubertin, M, Bussière, B, Mbonimpa, M, Dagenais, AM, Gosselin, M (2006). 'Measurement of oxygen consumption and diffusion in exposed and covered reactive mine tailings', in Barnhisel, RI (ed.), *7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, 26–30 March 2006, St Louis, Missouri, American Society of Mining and Reclamation, Lexington, Kentucky.
- MCA (Minerals Council of Australia) (1997). *Minesite water management handbook*, MCA, Canberra.
- MCA (Minerals Council of Australia) (2015a). *Enduring Value: the Australian minerals industry framework for sustainable development*, MCA, Canberra, http://www.minerals.org.au/file_upload/files/resources/Enduring_Value_principles_FINAL.pdf.
- MCA (Minerals Council of Australia) (2015b). *Towards closure: mine rehabilitation in the Australian minerals industry: achievements and challenges*, MCA, Canberra.
- McCullough, CD (2011). *Mine pit lakes: closure and management*, Australian Centre for Geomechanics, Perth.
- McCullough, CD, Lund, MA (2006). 'Opportunities for sustainable mining pit lakes in Australia', *Mine Water and the Environment*, 25:220–226.
- McCullough, CD, Pearce, JI (2014). 'What do elevated background contaminant concentrations mean for AMD risk assessment and management in Western Australia?', in *Proceedings: 8th Australian Workshop on Acid and Metalliferous Drainage* (pp. 147–158), 28 April – 2 May 2014, Adelaide, Australia.
- McCullough, CD, van Etten, EJB (2011). 'Ecological restoration of novel lake districts: new approaches for new landscapes', *Mine Water and the Environment*, 30:312–319.
- McCullough, CD, Marchand, G, Unseld, J (2013). 'Mine closure of pit lakes as terminal sinks: best available practice when options are limited?', *Mine Water and the Environment*, 32:302–313.
- McGregor, RG, Blowes, DW (2002). 'The physical and mineralogical properties of three cemented layers within sulfide-bearing mine tailings', *Journal of Geochemical Exploration*, August, 76:195–207.

McLean, JE, Bledsoe, BE (1992). 'Behaviour of metals in soils', *Ground Water Issues*, report EPA/540/S-92/018, US Environmental Protection Agency, 25 pp.

MCMPR-MCA (Ministerial Council on Mineral and Petroleum Resources and Minerals Council of Australia) (2010). *Strategic Framework for Managing Abandoned Mines in the Minerals Industry*, MCMPR and MCA, Canberra, <http://www.industry.gov.au/resource/Mining/Documents/StrategicFrameworkforManagingAbandonedMines.pdf>.

MEND (Mine Environment Neutral Drainage) (1995). *Economic evaluation of acid mine drainage technologies*, report 5.8.1, MEND.

MEND (Mine Environment Neutral Drainage) (2004). *Design, construction and performance monitoring of cover systems for waste rock and tailings*, report 2.21.4, vols. 1-5, edited by O'Kane Consultants Inc., MEND, July, <http://mend-nedem.org/category/prevention-and-control/>.

MEND (Mine Environment Neutral Drainage) (2005). *List of potential information requirements in metal leaching/acid rock drainage (ML/ARD) assessment and mitigation work*, report 5.10E, MEND.

Miller, S (2014). 'Leading practice solutions for acid rick drainage prevention and control: a key to achieving a sustainable future for mineral resource development', in Miller, H, Preuss, L (eds), *Proceedings of the Eighth Australian Workshop on Acid and Metalliferous Drainage* (pp. 51-66), 29 April - 2 May 2014, Adelaide, South Australia, JKTech Pty Ltd, Brisbane.

Miller, S, Robertson, A, Donahue, T (1997). 'Advances in acid drainage prediction using the net acid generation (NAG) test', in *Proceedings of 4th International Conference on Acid Rock Drainage* (pp. 533-549), Vancouver, British Columbia.

Naidu, R, Birke, V (eds) (2014). *Permeable reactive barrier: sustainable groundwater remediation*, CRC Press, 333 pp.

NHMRC (National Health and Medical Research Council) (2008). *Guidelines for managing risks in recreational water*, NHMRC, Canberra.

NHMRC-NRMMC (National Health and Medical Research Council and Natural Resource Management Ministerial Council) (2011). *National Water Quality Management Strategy: Australian drinking water guidelines*, NHMRC-NRMMC, Canberra, 1,244 pp.

NSW Auditor General (2014), *Managing contaminated sites*, http://www.audit.nsw.gov.au/ArticleDocuments/336/01_Managing_Contaminated_Sites_Full_Report.pdf.aspx?Embed=Y.

NTDME (2013). <http://www.nt.gov.au/d/rumjungle/index.cfm?header=Rehabilitation%20Plan>.

O'Kane, M (2011). 'State-of-the-art performance monitoring of cover systems: moving from point scale to macro scale approaches', in Bell, LC, Braddock, B (eds), *Proceedings of the Seventh Australian Workshop on Acid and Metalliferous Drainage*, 21-24 June 2011, Darwin, Northern Territory, JKTech Pty Ltd, Brisbane.

O'Kane Consultants Inc. (2003). *Evaluation of the long-term performance for dry cover systems: final report to the International Network for Acid Prevention*, http://www.inap.com.au/public_downloads/Research_Projects/Evaluation_of_the_Long-Term_Performance_of_Dry_Cover_Systems.pdf.

O'Kane, M, Ayres, B (2012). 'Cover systems that utilise the moisture store-and-release concept: do they work and how can we improve their design and performance?', in Fourie, AB, Tibbett, M (eds), *Mine closure 2012*, Proceedings of the Seventh International Conference on Mine Closure, 25-27 September 2012, Brisbane, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 9 pp.

- Oxley, G, Pape, S, Taylor, JR (2008). 'Rehabilitation of a highly sulphidic tailings dam in south-eastern Australia', in *Proceedings of the Sixth Australian Workshop on Acid and Metalliferous Drainage*, 15-18 April 2008, Burnie, Tasmania.
- Park, BT, Wangerud, KW, Fundingsland, SD, Adzic, ME, Lewis, NM (2006). 'In situ chemical and biological treatment leading to successful water discharge from Anchor Hill pit lake, Gilt Edge mine Superfund Site, South Dakota USA', in Barnhisel, RI (ed.), *Proceedings: 7th International Conference on Acid Rock Drainage* (pp. 1065-1069), 26-30 March 2006, St Louis, Missouri, American Society of Mining and Reclamation, Lexington, Kentucky.
- Patterson, BM, Robertson, BS, Woodbury, RJ, Talbot, B, Davis, GB (2006). 'Long-term evaluation of a composite cover overlaying a sulfidic tailings facility', *Mine Water and the Environment*, 25:137-145.
- Payant, R, Rosenblum, F, Nessel, J, Finch, J (2011). 'Galvanic interaction and particle size effects in self-heating of sulfide mixtures', in *Proceedings of the 43rd Annual Canadian Mineral Processors Conference*.
- Pearce, S, Barteaux, M (2014). 'Instrumentation of waste rock dumps as part of integrated closure monitoring and assessment', in *Proceedings of Mine Closure 2014 Conference*, Johannesburg, 1-3 October 2014, South Africa.
- Pearce, S, Scott, PA, Weber, P (2015). 'Waste rock dump geochemical evolution: matching lab data, models and predictions with reality', in *Proceedings of the Tenth International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, 21-24 April 2015, Santiago, Chile. 11pp.
- Pepper M, Roche CP, & Mudd GM (2014) Mining legacies-understanding life-of-mine across time and space, in *Proceedings Life of Mine 2014 Conference*, 16-18 July 2014, Brisbane, QLD, Australia, pp449-465
- Price, WA (2009). *Prediction manual for drainage chemistry from sulfidic geologic materials*, MEND report 1.20.1, CANMET-Mining and Mineral Sciences Laboratories. Smithers, British Columbia.
- Richards, DG, Borden, RK, Bennett, JW, Blowes, DW, Logsdon, MJ, Miller, SD, Slater, S, Smith, L, Wilson, GW (2006). 'Design and implementation of a strategic review of AMD risk in Rio Tinto', in Barnhisel, RI (ed.), *Proceedings of the Seventh International Conference on Acid Rock Drainage* (pp. 1657-1672), St Louis, Missouri, American Society of Mining and Reclamation.
- Ritchie, AIM (1994). 'Sulfide oxidation mechanisms: controls and rates of oxygen transport', in Jambor, JL, Blowes, DW (eds), *Short course handbook on environmental geochemistry of sulfide mine-wastes*, vol. 22, chapter 8, Mineralogical Association of Canada, Quebec.
- Ritchie, AIM, Bennett, JW (2003). 'The Rum Jungle mine: a case study', in Jambor, JL, Blowes, DW, Ritchie, AIM (eds), *Environmental aspects of mine wastes*, Mineralogical Association of Canada short course series, vol. 31, pp. 385-406, www.mineralogicalassociation.ca.

- Robertson, A, Kawashima, N, Smart, R, Schumann, R (2015). 'Management of pyrrhotite tailings at Savannah Nickel Mine: a decade of experience and learning', in *Proceedings of the 10th International Conference on Acid Rock Drainage and International Mining and Water Association Annual Conference*, Santiago, Chile, 21-24 April 2015.
- Romano, CG, Mayer, KU, Jones, DR, Ellerbroek, DA, Blowes, DW (2002). 'Effectiveness of various cover scenarios on the rate of sulfide oxidation of mine tailings', *Journal of Hydrology*, 271:171-187.
- SCER (Standing Council on Energy and Resources) (2013). *Multiple land use framework: background document*, SCER, Canberra, <https://scer.govspace.gov.au/workstreams/land-access/mluf/>.
- SCEW (Standing Council on Environment and Water) (2013). *National Environment Protection (Assessment of Site Contamination) Measure*, SCEW, Canberra, <http://www.scew.gov.au/nepms/assessment-site-contamination>.
- Schneider, A, Baumgartl, T, Doley, D, Mulligan, D (2010). 'Evaluation of heterogeneity of constructed landforms for rehabilitation using lysimeters', *Vadose Zone Journal*, 9:898-909.
- Schumann R, Robertson AM, Gerson AR, Fan R, Kawashima N, Li J and Smart StC (2015). Iron sulfides ain't iron sulfides: a comparison of acidity generated during oxidation of pyrite and pyrrhotite in waste rock and tailing materials. In *Proceedings of the 10th International Conference on Acid Rock Drainage and International Mining and Water Association Annual Conference*, 21-24 April 2015, Santiago, Chile.
- Scott, PA, Eastwood, G, Johnston, G, Carville, D (1997). 'Early exploration and pre-feasibility drilling data for the prediction of acid mine drainage for waste rock', in McLean, R, Bell, C (eds), *Proceedings of the 3rd Australian Workshop on Acid Mine Drainage* (pp. 195-201), Townsville, Australian Centre for Minesite Rehabilitation Research, Darwin Northern Territory.
- South Australian Government (2011). *Assessment report: environmental impact statement: Olympic Dam expansion*, Chapter 4, Section 4.3.12, pp. 87-91, www.olympicdameis.sa.gov.au/html/AssessmentReport/ODXAssessmentReport-web.pdf.
- Stewart, W, Miller, S, Thomas, JE, Smart, R (2003). 'Evaluation of the effects of organic matter on the net acid generation (NAG) test', in *Proceedings of the Sixth International Conference on Acid Rock Drainage* (pp. 211-222), 12-18 July 2003, Cairns.
- Taylor G, Spain A, Timms G, Kuznetsov, V, & Bennett J (2003). 'The medium-term performance of waste rock covers – Rum Jungle as a case study', in *Proceedings of the Sixth International Conference on Acid Rock Drainage* (pp. 383-397), 12-18 July 2003, Cairns, QLD, Australia.
- Taylor, J, Waring, C (2001). 'The passive prevention of ARD in underground mines by displacement of air with a reducing gas mixture: GaRDS', *Mine Water and the Environment*, 20:2-7.
- Taylor, JR, Pape, S, Murphy, NC (2005). 'A summary of passive and active treatment technologies for acid and metalliferous drainage (AMD)', in *Proceedings of the 5th Australian Workshop on Acid Drainage*, Freemantle, Western Australia.
- Team NT Toolkit (2004). https://minerals.nt.gov.au/__data/assets/pdf_file/0003/267915/TEAM-NT-Toolkit.pdf.
- UNWCED (United Nations World Commission on Environment and Development) (1987). *Our common future*, Oxford University Press, p. 27.
- USEPA (US Environmental Protection Agency) (1997). *Costs of remediation at mine sites*, USEPA Office of Solid Waste, January.

USGS (US Geological Survey) (2002). *Progress on geoenvironmental models for selected mineral deposit types*, Seal II, RR, Foley, NK (eds), US Geological Survey open file report 02-195, 217 pp., <http://pubs.usgs.gov/of/2002/of02-195/OF-02-195-508-V5.pdf>.

van Dam, RA, Humphrey, CL, Harford, AJ, Sinclair, AC, Jones, DR, Davies, S, Storey, AW (2014). 'Site-specific water quality guidelines: 1: Derivation approaches based on physicochemical, ecotoxicological and ecological data', *Environmental Science and Pollution Research*, 21:118-130.

Vandenberg, J, Lauzon, N, Prakash, S, Salzsauler, K (2011). 'Use of water quality models for design and evaluation of pit lakes', in McCullough, CD (ed.), *Mine pit lakes: closure and management* (pp. 63-80), Australian Centre for Geomechanics, Perth.

Vidic, RD (2001). *Permeable reactive barriers: case study review*, Groundwater Remediation Technologies Analysis Centre technology evaluation report TE-01-01, University of Pittsburgh, <http://www.gwrtac.org/pdf/PRBtmp.pdf>.

WA EPA (2014) *Cumulative environmental impacts of development in the Pilbara region*, August 2014, 33pp. http://epa.wa.gov.au/EPADocLib/Pilbara_s16e_advice%20_270814.pdf

Waters, P, O'Kane, M (2003). 'Mining and storage of reactive shale at BHP Billiton's Mt Whaleback Mine', in *Proceedings of the Sixth International Conference on Acid Rock Drainage* (pp. 155-161), 14-17 July 2003, Cairns, Australia.

Waters, J, Pape, S, Taylor, J (2014). 'Tools for assisting with the assessment of acid and metalliferous drainage (AMD)', in Miller, H, Preuss, L (eds), *Proceedings of the Eighth Australian Workshop on Acid and Metalliferous Drainage*, 29 April - 2 May 2014, Adelaide, South Australia, JKTech Pty Ltd, Brisbane, pp. 435.

Williams, DJ, Wilson, GW, Currey, NA (1997). 'A cover system for a potentially acid forming waste rock dump in a dry climate', in *Tailings and mine waste '97: proceedings of the 4th International Conference on Tailings and Mine Waste* (pp. 231-235), 13-17 January 1997, Fort Collins, Colorado, AA Balkema, Rotterdam.

Williams, DJ, Stolberg, DJ, Currey, NA (2006). 'Long-term performance of Kidston's "store/release" cover system over potentially acid forming waste rock dumps', *Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage* (pp. 2385-2396), 26-30 March 2006, St Louis, Missouri.

Williams, DJ & Rohde, TK (2007). Saturation required for continuum flow through different mine waste materials. In: Ameratunga, J., Taylor, B. and Patten, M., *Proceedings of the 10th Australia New Zealand Conference in Geomechanics 2007*. Common Ground, Brisbane, Queensland, Australia, (pp280-285). 21-24 October, 2007.

Williams, DJ and Rohde, TK (2008). Rainfall infiltration into and seepage from rock dumps - A review. In: Fourie, A., *Proceedings of the First International Seminar on the Management of Rock Dumps, Stockpiles and Heap Leach Pads*. Rock Dumps 2008, Perth, Western Australia, (pp79-89). 5-6 March 2008.

Williams, D, Fowler, J, van Zyl, D (2015). 'Mine planning and acid rock management', in *Proceedings of the 10th International Conference on Acid Rock Drainage and IMWA 2015*, 21-24 April - 1 May 2015, Santiago, Chile, 10 pp.

Wilson, GW (2008). 'Why are we still struggling with acid rock drainage?', *Geotechnical News*, June, pp. 51-56.

Wilson, GW, Williams, DJ, Rykaar, EM (2003). 'The integrity of cover systems: an update', in *Proceedings of 6th International Conference on Acid Rock Drainage* (pp. 445-451), 14-17 July 2003, Cairns, Australia.

Wilton, MJ, Lawrence, GA (1998). 'The evolution of the Island Copper Mine pit lake', in *Proceedings of the 22nd Annual British Columbia Mine Reclamation Symposium*, Penticton, British Columbia, <http://www.trcr.bc.ca/wp-content/uploads/2011/11/1999-wilton-lawrence.pdf>.

Woollard, J (2014). 'Overcoming the challenges of legacy mines in the Northern Territory', *AusIMM Bulletin*, June, 3:55-56.

World Bank (2007). *Environmental, health and safety guidelines for mining*, International Finance Corporation, World Bank Group, Washington DC.

Wright, J, Conca, JL (2006). 'Remediation of groundwater contaminated with Zn, Pb and Cd using a permeable reactive barrier with Apatite II', in Barnhisel, RI (ed.), *7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)* (pp. 2514-2527), 26-30 March 2006, St Louis, Missouri, American Society of Mining and Reclamation, Lexington, Kentucky.

Wunderly, MD, Blowes, DW, Frind, EO, Ptacek, CJ (1996). 'Sulfide mineral oxidation and subsequent reactive transport of oxidation products in mine tailings impoundments: a numerical model', *Water Resources Research*, 32(10):3,173-3,187.