EARTHWORKS

Tailing yang Difilter di Indonesia

Kegagalan Katastropik dari Sebuah Teknologi Disruptif

Laporan Teknis: Steven H. Emerman, PhD, Malach Consulting
Ringkasan, Analisis, dan Rekomendasi: Ellen Moore, Jan Morrill, Vuysile Ncube, Paulina Personius, dan Arianto Sangadji, Earthworks

www.earthworks.org

2026

Tailing yang Difilter di Indonesia

Kegagalan Katastropik dari Sebuah Teknologi Disruptif

Laporan Teknis: Steven H. Emerman, PhD, Malach Consulting
Ringkasan, Analisis, dan Rekomendasi: Ellen Moore, Jan Morrill, Vuysile Ncube, Paulina Personius, dan Arianto Sangadji, Earthworks

Maret 2026

Didukung oleh: WALHI Sultra, WALHI Sulawesi Selatan, WALHI Maluku Utara, Yayasan Tanah Merdeka (YTM), PUSPAHAM, Satya Bumi, Aksi Ekologi, dan Emansipasi Rakyat (AEER)

Laporan tersedia di: earthworks.org/tailing-di-indonesia
Untuk melihat tanggapan terhadap laporan ini dari perusahaan pertambangan dan produsen otomotif, kunjungi earthworks.org/tailing-di-indonesia

Foto sampul: Fasilitas tailing yang difilter atas izin para pekerja di Indonesia Morowali Industrial Park Terjemahan ke bahasa Indonesia: Johny Barliyanta

Daftar Isi

Ringkasan, analisis, dan rekomendasi berdasarkan laporan Tailing yang Difilter di Indonesia: Kegagalan Katastropik dari Sebuah Teknologi Disruptif ***1***

Meningkatnya permintaan nikel dan berkembangnya pemurnian menggunakan teknologi High-Pressure Acid Leaching (pelindian asam bertekanan tinggi/HPAL) **1**

Teknologi HPAL dan keselamatan tailing **2**

Teknologi yang belum teruji menghadapi kondisi iklim basah dan aktivitas seismik **3**

Risiko dan dampak tailing HPAL **4**

Kegagalan Fasilitas Tailing 4
Pencemaran Air 6
Risiko bagi Pekerja 7
Penerapan metode penyimpanan tailing berisiko lainnya 7
Deforestasi 8

Standar dan pengawasan yang tidak memadai **9**

Perlunya uji tuntas dari pembeli nikel **9**

Rekomendasi Earthworks **10**

Rekomendasi Khusus **11**

Lampiran A: Rekomendasi untuk Pemerintah Indonesia 11
Lampiran B: Rekomendasi untuk Perusahaan Operator 15
Lampiran C: Rekomendasi untuk Produsen Otomotif dan Pembeli di Sektor Hilir 18
Lampiran D: Rekomendasi untuk Investor 20

Referensi **22**

Tailing yang Difilter di Indonesia: Kegagalan Katastropik dari Sebuah Teknologi Disruptif **26**

Pernyataan penyangkalan 26

Abstrak 26

Ringkasan eksekutif 31

Ikhtisar 39

Tutorial mengenai aspek-aspek penting pertambangan di indonesia **60**

Bijih Laterit dan Pelindian Asam Bertekanan Tinggi 60
Alternatif untuk Pembuangan Tailing Tambang 61
Likuifaksi 66
Teknologi Limbah Tailing yang Difilter 69
Metode Kesetimbangan Batas dan Faktor Keamanan 81
Model Deterministik vs. Statistik untuk Analisis Kegagalan Fasilitas Tailing 83
Drainase Asam Tambang dan Pelindian Logam 90
Regulasi Tailing di Indonesia 92
Safety First: Panduan Pengelolaan Tailing Tambang yang Bertanggungjawab 96

Ringkasan fasilitas penyimpanan limbah tailing yang difilter di indonesia 100

Batas teknologi saat ini untuk tailing yang difilter 111

Pulau obi: ancaman keruntuhan katastrofik yang nyata 122
Kontaminasi air tanah 122
Kerentanan terhadap Likuifaksi 129
Kurangnya Pengendalian Mutu, Pemantauan, dan Kepatuhan terhadap Desain 138
Minimnya rencana penutupan 142
Ketidakrealistisan dalam Analisis Kerusakan Bendungan 143
Genangan Permukaan dan Pembiaran 146
Kepatuhan terhadap Regulasi Indonesia 154
Fasilitas Tailing yang Tidak Stabil 154

Pulau sulawesi: kegagalan katastrofik yang tengah berlangsung 158
Likuefaksi dan Tumpahan Tailing pada 16 Maret 2025 158
Longsor Tailing dan Korban Jiwa Pekerja pada 21 Maret 2025 163
Runtuhnya Tumpukan Bijih pada 27 Maret 2025 166
Longsoran Tailing pada 30 April 2025 dan Longsoran Sebelumnya 167
Tanggapan Pemerintah dan Perusahaan terhadap Kegagalan Katastrofik 168

Skenario berbahaya yang terbentang di depan 173

Skenario alternatif ke depan 177

Rekomendasi 177

Tentang penulis 178

Daftar pustaka 179

Ringkasan, analisis, dan rekomendasi berdasarkan laporan *Tailings yang Difilter di Indonesia: Kegagalan Katastropik dari Sebuah Teknologi Disruptif*

Meningkatnya permintaan nikel dan berkembangnya pemurnian menggunakan teknologi High-Pressure Acid Leaching (pelindian asam bertekanan tinggi/HPAL)

Indonesia berada di persimpangan antara sektor pertambangan, isu iklim, dan hak asasi manusia. Nikel merupakan salah satu mineral utama yang digunakan dalam baterai kendaraan listrik, dan Indonesia sedang meningkatkan produksinya untuk memenuhi lonjakan permintaan yang sangat pesat. Antara tahun 2023 hingga 2050, permintaan nikel global diperkirakan akan meningkat dua kali lipat[i], dan dalam sembilan tahun terakhir produksi Indonesia telah meningkat dari 5,7% menjadi 62,26% dari total produksi nikel tambang dunia.[ii] [iii]

Peningkatan kegiatan penambangan dan pengolahan nikel di Indonesia berarti peningkatan volume limbah tambang. Pendorong utama peningkatan limbah tambang ini adalah High-Pressure Acid Leaching (pelindian asam bertekanan tinggi/HPAL), sebuah teknologi yang memroses bijih nikel berkadar rendah dan memurnikannya untuk menghasilkan presipitat hidroksida campuran, yaitu bahan antara (prekursor) untuk salah satu komponen utama baterai kendaraan listrik. Fasilitas pengolahan HPAL menghasilkan limbah beracun dalam jumlah yang sangat besar. Setiap satu ton metrik logam nikel yang dihasilkan menggunakan HPAL menghasilkan 133 ton metrik limbah.[iv]

HPAL merupakan teknologi yang berkembang sangat pesat di Indonesia. Jumlah limbah yang dihasilkan oleh fasilitas-fasilitas ini juga meningkat dengan sangat cepat. Hingga Juni 2025, terdapat tujuh fasilitas HPAL yang beroperasi di Indonesia: dua fasilitas milik Harita Nickel di Pulau Obi, Maluku Utara; satu fasilitas di Indonesia Weda Bay Industrial Park (IWIP) di Pulau Halmahera, Maluku Utara; dan empat fasilitas di Indonesia Morowali Industrial Park (IMIP) di Sulawesi Tengah. Fasilitas-fasilitas ini saja diperkirakan menghasilkan sedikitnya 57 juta ton metrik tailing per tahun.[v] Sejak saat itu, dua fasilitas HPAL tambahan di IMIP telah mulai beroperasi, yang berpotensi meningkatkan total volume tailing menjadi sekitar 62,6 juta ton per tahun[vi]. Selain itu, terdapat 12 proyek HPAL tambahan yang telah memperoleh izin dan/atau sedang

dalam tahap pembangunan, serta 12 proyek HPAL lainnya yang masih berada pada tahap proposal. Kondisi ini mengisyaratkan akan adanya peningkatan tajam dari segi volume tailing beracun yang dihasilkan, seiring dengan upaya memenuhi permintaan baterai kendaraan listrik. Apabila seluruh proyek HPAL yang telah beroperasi, yang telah memperoleh izin, maupun yang masih diusulkan benar-benar dibangun, maka total tailing yang dihasilkan dapat mencapai 275 juta ton metrik per tahun.[vii]

Besarnya volume limbah beracun yang dihasilkan oleh fasilitas pengolahan HPAL, baik saat ini maupun di masa depan, menghadirkan risiko yang sangat besar terhadap lingkungan dan masyarakat. Tailing dari proses HPAL bersifat sangat asam, beracun, dan mengandung logam berat. Tantangan ini semakin diperparah oleh kondisi khusus di Indonesia, terutama ketiadaan standar yang jelas untuk fasilitas penyimpanan tailing dalam regulasi nasional, serta iklim yang basah dan kondisi geografis yang rawan gempa bumi serta tanah longsor.

Teknologi HPAL dan keselamatan tailing

Pada awalnya, perusahaan-perusahaan yang mengembangkan proyek HPAL di IMIP dan Pulau Obi berencana menggunakan praktik lama, yaitu membuang tailing ke laut, yang masih diperbolehkan dalam regulasi Indonesia[viii]. Namun, Pemerintah Indonesia kemudian mengumumkan bahwa mereka tidak akan menerbitkan izin untuk praktik tersebut, sehingga perusahaan-perusahaan tersebut terpaksa menyimpan limbah tersebut di darat.[ix] Semua fasilitas pengolahan HPAL kemudian mengubah rencananya untuk menggunakan penyimpanan tailing yang difilter, yang oleh para operator di Indonesia sering disebut sebagai “timbunan tailing kering (dry stack tailings)”.

Jumlah air dalam suatu fasilitas penyimpanan tailing dapat secara langsung memengaruhi stabilitas fisiknya. Tailing yang difilter, yang memerlukan pengurangan kadar air sebelum ditempatkan di fasilitas penyimpanan tailing, dianggap sebagai praktik terbaik dalam industri karena beberapa alasan, antara lain berkurangnya kemungkinan terjadinya kegagalan serta berkurangnya dampak apabila kegagalan tersebut terjadi. Selain itu, fasilitas tailing yang difilter juga memudahkan proses penutupan lokasi tambang ketika kegiatan penambangan dan pengolahan telah berakhir.

Di Indonesia maupun di negara lain, penggunaan istilah “dry stack tailings” merupakan istilah pemasaran dan hubungan masyarakat yang menciptakan kesan seolah-olah sistem tersebut aman serta berfungsi sebagai bentuk *greenwashing* terhadap kegiatan penambangan dan pengolahan mineral. Penggunaan kata “dry” menimbulkan konotasi seolah-olah bendungan tailing hampir tidak mengandung air, padahal pada

kenyataannya tailing yang difilter memiliki kondisi yang mirip dengan tanah yang lembab.

Di Indonesia, perusahaan-perusahaan HPAL menjanjikan penggunaan tailing yang difilter atau tailing yang disebut sebagai “kering” sebagai cara untuk mengurangi potensi risiko ketidakstabilan. Namun dalam praktiknya, mereka sebenarnya tidak memenuhi persyaratan teknis yang diperlukan untuk mewujudkan janji tersebut.[x] Bahkan jika perusahaan berhasil menghasilkan tailing dengan kadar air yang sesuai, curah hujan dapat memengaruhi selisih kecil antara kondisi tailing yang optimal atau aman dan kondisi kejenuhan.[xi]

Dalam beberapa kasus, fasilitas tersebut bahkan tidak secara konsisten menurunkan kadar air hingga mencapai target yang mereka klaim. Sebagai contoh, target kadar air tailing dari kilang HPAL milik PT Halmahera Persada Lygend di operasi Harita di Pulau Obi adalah 35%, namun kadar air aktual yang dilaporkan berkisar antara 8% hingga 36%. Kesenjangan yang sangat besar ini menunjukkan kurangnya pengendalian mutu, membuat pemadatan tailing secara memadai menjadi tidak mungkin dilakukan, dan secara signifikan meningkatkan kemungkinan terjadinya kegagalan katastrofik.[xii]

Teknologi yang belum teruji menghadapi kondisi iklim basah dan aktivitas seismik

Meskipun tailing yang difilter dianggap sebagai praktik terbaik dalam industri, teknologi ini tetap memiliki risiko, terutama di wilayah dengan iklim basah yang rawan gempa bumi dan tanah longsor. Studi yang masih terbatas mengenai praktik ini menunjukkan adanya kesulitan dalam *dewatering* (mengurangi kandungan air) pada tailing HPAL serta mempertahankan kadar air yang diperlukan dalam kondisi curah hujan tinggi.[xiii]

Terdapat lima faktor lingkungan yang membuat penerapan tailing yang difilter secara efektif di Indonesia menjadi sangat menantang. Faktor-faktor tersebut meliputi aktivitas seismik yang tinggi; curah hujan yang tinggi; tanah vulkanik yang lunak yang menjadi fondasi yang lemah serta rentan terhadap likuifaksi; topografi yang curam dengan risiko tanah longsor; serta aktivitas vulkanik. Tantangan ini semakin diperburuk oleh lemahnya regulasi di tingkat nasional terkait fasilitas penyimpanan tailing, serta kurangnya penegakan terhadap regulasi yang sebenarnya sudah ada.[xiv]
Analisis terhadap fasilitas HPAL yang beroperasi, termasuk Huafei Nickel Cobalt (HFNC) di IWIP dan PT Halmahera Persada Lygend (PT HPL) di fasilitas Harita Nickel di Pulau Obi, menunjukkan bahwa proyek-proyek tersebut memiliki ketinggian yang lebih besar dan diperkirakan akan memproses serta menyimpan limbah dalam jumlah lebih banyak dibandingkan fasilitas penyimpanan tailing di wilayah lain di dunia[xv]

dengan tingkat curah hujan yang sebanding. Hal ini menunjukkan bahwa perusahaan pertambangan dan pengolahan menggunakan teknologi ini dengan cara yang belum diuji secara memadai dalam kondisi lingkungan yang sangat menantang tersebut, sehingga menimbulkan risiko bagi lingkungan serta keselamatan pekerja dan masyarakat setempat. Fasilitas pengolahan HPAL Sonic Bay yang diusulkan di IWIP juga ditemukan jauh melampaui batas kemampuan teknologi saat ini untuk pengelolaan tailing yang terbukti aman.[xvi] Karena keterbatasan data, analisis ini belum dapat secara pasti menarik kesimpulan yang sama jika diterapkan pada fasilitas tailing HPAL lain yang saat ini beroperasi di IMIP maupun pada operasi Harita Nickel lainnya di Pulau Obi. Namun demikian, sangat mungkin bahwa fasilitas tailing HPAL lainnya juga beroperasi melampaui batas yang diketahui aman.

Risiko dan dampak tailing HPAL

Fasilitas penyimpanan tailing di Indonesia menimbulkan risiko yang sangat besar bagi masyarakat, pekerja, dan lingkungan, misalnya yang diakibatkan oleh kegagalan fasilitas tailing, pencemaran air kronis, masalah keselamatan dan kesehatan kerja, deforestasi, serta potensi pembuangan tailing ke laut dalam.

Meskipun beberapa risiko tersebut dapat diperparah oleh kombinasi teknologi pengolahan HPAL dan teknologi penyaringan tailing, risiko tersebut tidak hanya bersumber pada teknologi ini. Fasilitas tailing konvensional yang menggunakan sistem slurry juga berisiko menimbulkan ancaman. Fasilitas tailing yang difilter dari proses HPAL telah menimbulkan dampak yang signifikan terhadap masyarakat dan lingkungan di sekitarnya, dan peningkatan produksi tailing kemungkinan akan meningkatkan frekuensi serta tingkat keparahan dampak yang terjadi.

Kegagalan Fasilitas Tailing

Fasilitas tailing yang difilter dari limbah HPAL telah mengalami kegagalan di IMIP, dan laporan konsultan independen yang didapatkan dari kebocoran data menunjukkan bahwa risiko kegagalan tailing akan segera terjadi pada operasi Harita Nickel di Pulau Obi. Fasilitas tailing HPAL yang diusulkan maupun yang telah beroperasi di IWIP serta operasi Harita Nickel di Pulau Obi berada jauh di luar batas kemampuan teknologi saat ini untuk pengelolaan tailing yang terbukti aman.[xvii]

Tinjauan teknis pada tahun 2022 oleh perusahaan konsultan SRK terhadap fasilitas PT Halmahera Persada Lygend (PT HPL) yang dikenal sebagai “Dry-Stack Tailing Facility” (DSTF) juga memperingatkan adanya potensi kegagalan katastrofik pada fasilitas tailing. SRK menggambarkan kegagalan fasilitas tailing tersebut sebagai “risiko yang tidak terkendali”, mengingat fasilitas tersebut dibangun tanpa adanya sistem pengendalian mutu maupun perangkat dan sistem pemantauan standar.[xviii]

Perusahaan konsultan lain, PT Lapi ITB, juga memperingatkan bahwa sebagian dari DSTF PT HPL tidak akan stabil terdampak aktivitas seismik apabila operasi semacam ini terus dilanjutkan sesuai rencana. Analisis terhadap korespondensi perusahaan dan laporan konsultan yang didapatkan dari kebocoran data menunjukkan bahwa DSTF PT HPL di operasi Harita sudah tidak dapat diperbaiki, dan bahkan jika pengendalian mutu yang sempurna diterapkan, tailing tersebut tetap berisiko mengalami likuifaksi dan kegagalan katastrofik, yang berpotensi berdampak pada pekerja, Desa Kawasi, saluran air di sekitarnya, serta Laut Maluku. Meskipun terdapat peringatan tersebut, PT HPL tetap terus menambahkan tailing ke fasilitas-fasilitas ini.[xix]

Sebuah laporan internal perusahaan PT HPL pada tahun 2023 menunjukkan bahwa salah satu dari empat fasilitas tailing HPAL yang difilter berukuran lebih kecil di Pulau Obi berada di ambang kegagalan katastrofik, dan lokasinya berada tepat di bagian atas (hulu) infrastruktur pertambangan serta area tempat para pekerja berada. Fasilitas-fasilitas ini tidak dianalisis dalam laporan sebelumnya yang disusun oleh konsultan eksternal.

Di Indonesia Morowali Industrial Park (IMIP), kegagalan fasilitas tailing yang berbahaya bahkan mematikan telah terjadi. Menurut laporan media dan kesaksian para pekerja, pada 16 Maret 2025 fasilitas penyimpanan tailing milik PT Huayue Nickel Cobalt (PT HYNC) di dalam kawasan IMIP mengalami jebol, dan tailing yang telah cair mengalir ke Sungai Bahodopi dan akhirnya ke laut.[xx]

Lima hari kemudian, pada 21 Maret, fasilitas tailing lain di dalam IMIP yang dimiliki oleh PT Qing Mei Bang (PT QMB) New Energy Materials runtuh dan menewaskan tiga pekerja.[xxi] Menurut kesaksian pekerja yang diwakili oleh SPIM-KPBI, serikat pekerja terbesar kedua di IMIP, fasilitas tailing tersebut dibangun di atas kolam yang telah ditimbun. Foto-foto yang diambil di lokasi upaya penyelamatan menunjukkan adanya kolam di tempat jenazah salah satu pekerja ditemukan. Fasilitas tailing PT QMB yang runtuh tersebut berada tepat di sebelah fasilitas tailing PT Huayue Nickel Cobalt (PT HYNC), di lokasi yang secara lokal dikenal sebagai KM8. Tidak jelas apakah kedua fasilitas tersebut sebenarnya beroperasi sebagai satu sistem.

Pada 18 Februari 2026, kegagalan lain dilaporkan menewaskan satu orang dan menghentikan operasi di IMIP.[xxii] [xxiii] Menurut laporan CNBC Indonesia, korban yang meninggal adalah seorang pekerja asal Palopo, Sulawesi Selatan.[xxiv] Ia tidak sempat melakukan evakuasi dan tertimbun longsor di dalam sebuah ekskavator. Juru bicara IMIP, Dedy Kurniawan, menyatakan bahwa kejadian longsor terbaru tersebut diduga dipicu oleh kondisi tanah yang rapuh di bagian bawah area pembuangan tailing, yang tidak mampu menopang berat timbunan tailing.[xxv]

Citra satelit menunjukkan bahwa kegagalan fasilitas tailing di IMIP pada Maret 2025 kemungkinan bukan merupakan kejadian pertama. Gambar yang diambil pada 3 Januari 2025 menunjukkan tanah longsor yang jelas terlihat berasal dari fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT HYNC, dengan jalur aliran yang memungkinkan tailing mengalir menuju Sungai Bahodopi. Sebuah video yang direkam oleh seorang pekerja tambang pada September 2023 juga menunjukkan sebuah bulldozer tertimbun oleh tanah longsor di sebuah fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di IMIP yang tidak teridentifikasi.[xxvi]

Pencemaran Air

Zat beracun yang terkandung dalam tailing dapat bocor dan mencemari air tanah, air permukaan, maupun laut. Tailing dari kegiatan penambangan nikel dan pengolahan bijih nikel melalui proses High-Pressure Acid Leaching (pelindian asam bertekanan tinggi/HPAL) dapat melepaskan zat karsinogen beracun yang disebut kromium heksavalen, yang juga dikenal sebagai kromium-6. Zat ini dapat menyebabkan gangguan pernapasan serta meningkatkan risiko kanker.[xxvii]

Pada Mei 2025, *The Organized Crime and Corruption Reporting Project* (OCCRP), *The Gecko Project*, dan para mitranya mengungkap bahwa Harita Group — salah satu pemasok nikel utama di dunia — telah mengetahui selama lebih dari satu dekade bahwa operasinya di Pulau Obi mencemari air dengan bahan kimia beracun kromium-6.[xxviii] Sebuah laporan tahun 2022 dari SRK Consulting mendokumentasikan adanya pencemaran air tanah yang berasal dari fasilitas tailing PT Halmahera Persada Lygend (PT HPL) di Pulau Obi. Laporan tahun 2020 dari kelompok konsultan PT Lapi ITB memperkirakan bahwa 29.326 meter kubik air yang berpotensi tercemar akan merembes ke dalam akuifer di bawah fasilitas tailing tersebut, dengan kemungkinan menyebar ke seluruh sistem air tanah.[xxix] Bahkan hingga 2023, dokumen yang diretas mengungkapkan adanya kadar bahan kimia tersebut pada tingkat yang berbahaya, sementara Harita secara terbuka menyangkal adanya bahaya terhadap air minum masyarakat. Tingkat kromium-6 pada tahun 2023 tercatat lebih dari tiga kali lipat ambang batas hukum Indonesia untuk air minum.[xxx]

Keberadaan logam berat beracun, termasuk kromium heksavalen, juga telah didokumentasikan di berbagai operasi penambangan dan pemurnian nikel lainnya di Indonesia. WALHI Sulawesi Selatan telah mendokumentasikan keberadaan kromium heksavalen di Sungai Lawewu, di Kecamatan Nuha, serta pada sumber air masyarakat di Desa Asuli, Kecamatan Towuti, Sulawesi Selatan, sejak Juli 2022. Pencemaran tersebut dikaitkan dengan kegiatan penambangan nikel yang dilakukan oleh PT Vale Indonesia.[xxxi] Pada Februari 2024, WALHI Sulawesi Tengah bersama Friends of the Earth Japan menemukan kadar kromium heksavalen yang mengkhawatirkan di Sungai Bahodopi,[xxxii] yang telah tercemar berat oleh kegiatan penambangan dan pengolahan nikel di Morowali.

Contoh-contoh tersebut menunjukkan adanya masalah pencemaran air kronis yang terkait dengan industri pertambangan nikel. Meskipun contoh-contoh terakhir tersebut

belum dapat secara langsung dikaitkan dengan fasilitas penyimpanan tailing dari proses HPAL, kasus pencemaran kromium-6 yang terus berlangsung pada operasi pertambangan dan penyimpanan tailing milik Harita menunjukkan adanya masalah serius serta mengindikasikan potensi terjadinya pencemaran serupa pada operasi penambangan nikel dan fasilitas pengolahan HPAL di seluruh Indonesia.

Risiko bagi Pekerja

Para pekerja tambang mempertaruhkan nyawa mereka ketika harus bekerja di fasilitas tailing yang tidak aman. Kegagalan katastrofik bendungan tailing di Brumadinho, Brasil pada tahun 2019 menewaskan 272 orang, lebih dari 90% di antaranya adalah pekerja tambang yang berada di lokasi.[xxxiii] Kegagalan fasilitas tailing pada 21 Maret 2025 di IMIP menewaskan tiga pekerja. Kondisi kerja yang tidak aman telah menyebabkan kematian lainnya di fasilitas nikel tersebut. Pada Januari 2025, dua pekerja tertimbun hidup-hidup oleh tanah longsor yang disebabkan oleh aktivitas pertambangan.[xxxiv] Komunikasi internal pada tahun **2023** juga mengungkapkan bahwa sebuah fasilitas tailing milik PT Halmahera Persada Lygend (PT HPL) berada di ambang kegagalan, sehingga membahayakan keselamatan para pekerja tambang.[xxxv]

Kondisi kerja yang buruk di fasilitas penambangan dan peleburan nikel di Indonesia merupakan masalah yang serius, dan kasus kecelakaan kerja sering terjadi, termasuk yang berujung pada kematian di berbagai lokasi di seluruh negeri. Sebuah laporan mencatat 300 kecelakaan kerja dengan 31 korban meninggal di kawasan IMIP antara 2023 hingga 2024.[xxxvi] Dari Januari hingga Mei 2025, delapan kecelakaan kerja lainnya menyebabkan tujuh pekerja meninggal di IMIP.[xxxvii] Pada 2024, China Labor Watch merilis sebuah video yang menggambarkan kondisi yang sangat keras yang dialami para pekerja asal Tiongkok di IMIP, termasuk kondisi kerja yang tidak aman, jadwal kerja yang sangat berat, serta pembatasan kebebasan dasar seperti kebebasan bergerak.[xxxviii] Video tersebut juga menyoroti bagaimana subkontraktor asal Tiongkok sering mengalami perlakuan yang lebih buruk, karena status imigrasi dan pekerjaan mereka tidak memungkinkan mereka untuk bergabung dengan serikat pekerja tambang.

Penerapan metode penyimpanan tailing berisiko lainnya

Konstruksi, pengelolaan, dan pengawasan yang buruk terhadap tailing yang difilter, tantangan lingkungan yang tidak dapat dihindari, potensi kegagalan katastrofik yang segera terjadi serta pencemaran air di berbagai lokasi di Indonesia dapat mendorong perusahaan untuk beralih ke praktik pengelolaan tailing lainnya. Sayangnya, alternatif lain dari tailing yang difilter juga berbahaya.

Pembuangan tailing ke laut dalam (deep sea tailings disposal) merupakan praktik lama yang berbahaya dan telah dihentikan di banyak bagian dunia, meskipun beberapa proyek pertambangan baru masih mengusulkan penggunaannya di Norwegia dan

Papua Nugini. Praktik ini berisiko menimbun dasar laut dan terumbu karang, serta merusak daerah penangkapan ikan, mata pencaharian masyarakat, dan kesehatan ekosistem pesisir.[xxxix] Pembuangan tailing ke laut, sungai, dan danau tidak dilarang dalam regulasi Indonesia.

Metode berbahaya lainnya adalah pembangunan bendungan tailing konvensional berbasis slurry atau "basah". Hingga tahun 2022, PT HPL di Pulau Obi telah berupaya membangun tiga fasilitas tailing konvensional,[xl] meskipun sebelumnya perusahaan tersebut sendiri menyatakan bahwa opsi tersebut terlalu berisiko.[xli] Pada Juni 2025, Lygend Resources mengumumkan bahwa mereka telah menyelesaikan pembangunan "kolam tailing dengan pembuangan basah" (wet-discharge tailing pond) pertama dari jenisnya di Pulau Obi,[xlii] meskipun menurut Global Tailings Portal[xliii] sebenarnya telah ada beberapa fasilitas penyimpanan tailing basah di Indonesia sejak 1992. Lygend menyatakan bahwa fasilitas tersebut merupakan peningkatan dibandingkan dengan "proses penimbunan kering" (dry piling process) yang ada saat ini, dengan alasan kekhawatiran terhadap debu dan aktivitas seismik.[xliv] Namun, bendungan tailing konvensional atau "basah" mengalami kegagalan dengan frekuensi dan tingkat keparahan yang semakin meningkat di berbagai belahan dunia.[xlv] Kondisi curah hujan tinggi dan aktivitas seismik di Indonesia, ditambah dengan pengawasan yang lemah serta rekam jejak penutupan fasilitas yang tidak konsisten, menimbulkan risiko yang jauh lebih besar bagi masyarakat, pekerja, dan lingkungan.

Deforestasi

Fasilitas penyimpanan tailing, baik tailing yang difilter maupun tailing konvensional, memerlukan lahan yang sangat luas, selain area yang telah digunakan untuk kegiatan penambangan dan pengolahan nikel itu sendiri.[xlvi] Ekspansi fasilitas pengolahan HPAL yang telah beroperasi, telah memperoleh izin, maupun yang direncanakan—beserta limbah yang dihasilkannya—berpotensi mendorong peningkatan deforestasi. Bahaya yang ditimbulkan oleh tailing yang difilter dalam konteks Indonesia dapat menyebabkan perusahaan tidak membangun fasilitas secara vertikal, tetapi justru menyebarkan timbunan limbah secara horizontal, sehingga memperluas jejak area fasilitas dan menghancurkan lebih banyak hutan dalam upaya mengurangi risiko ketidakstabilan. Deforestasi juga memperburuk kejadian banjir, sehingga menambah risiko bagi masyarakat yang tinggal di sekitar operasi pertambangan. Di Pulau Obi, hujan lebat dan kegagalan sebagian kolam sedimen yang dirancang untuk menahan limpasan dari operasi pertambangan Harita Nickel menyebabkan banjir yang merendam rumah-rumah penduduk dan sumber air di Desa Kawasi.[xlvii]
Risiko lainnya adalah potensi pembangunan fasilitas tailing konvensional baru yang dapat mendorong terjadinya deforestasi. Jejak lahan (footprint) dari tiga bendungan tailing konvensional yang diusulkan di Pulau Obi diperkirakan delapan kali lebih luas dibandingkan dengan jejak maksimum yang diproyeksikan dari fasilitas tailing yang difilter milik PT HPL.[xlviii]

Standar dan pengawasan yang tidak memadai

Struktur pengawasan dan regulasi yang seharusnya melindungi kualitas udara dan air, hak-hak pekerja, serta keselamatan masyarakat tidak berhasil mengendalikan risiko yang ditimbulkan oleh fasilitas tailing HPAL di Indonesia. Regulasi mengenai tailing yang ada saat ini pada umumnya tidak bersifat kuantitatif, tersebar di berbagai dokumen, dan lebih berfokus pada persyaratan administratif untuk memperoleh izin, bukan pada jaminan keselamatan fasilitas. Selain itu, terdapat ketidaksesuaian antara standar keselamatan bendungan yang kadang diterapkan dalam praktik dengan ketentuan regulasi yang secara resmi tercantum dalam hukum Indonesia. Indonesia juga belum memiliki regulasi atau standar khusus yang mengatur tailing yang difilter.

Dokumen yang bocor dari Harita Group menunjukkan bahwa tiga perusahaan konsultan internasional yang dilibatkan sebagai peninjau independen untuk proyek-proyek di Pulau Obi telah mengidentifikasi berbagai risiko, ketidaksesuaian, dan kelemahan dalam perancangan teknis. Secara khusus, SRK Consulting menyoroti ketiadaan sistem pemantauan maupun inspeksi rutin pada fasilitas tailing PT HPL.

Namun, dokumen yang sama juga menunjukkan bahwa konsultan eksternal yang disewa oleh perusahaan pertambangan tidak selalu menjadi sumber informasi independen yang dapat diandalkan mengenai risiko dari operasi tersebut. Meskipun SRK Consulting mencatat sejumlah kegagalan, laporan tersebut juga mengabaikan atau meminimalkan informasi penting mengenai genangan air dan sistem drainase yang buruk yang teramati pada fasilitas tailing PT HPL, yang merupakan indikasi serius terhadap potensi masalah stabilitas fasilitas.[xlix]

Perlunya uji tuntas dari pembeli nikel

Dampak buruk terhadap hak asasi manusia dan lingkungan yang terkait dengan produksi dan penyimpanan limbah beracun dari fasilitas pengolahan HPAL di IWIP dan IMIP juga melibatkan perusahaan otomotif seperti BMW, Mercedes-Benz, Tesla, dan Volkswagen (VW) yang, melalui hubungan rantai pasok mereka dengan Huayou Cobalt atau CATL, memperoleh pasokan nikel dari kawasan industri tersebut.[l]

Melalui pengadaan nikel melalui hubungan kontraktual dengan GEM, Huayou Cobalt, dan CATL, perusahaan-perusahaan seperti BMW, Ford, General Motors, Honda, Mercedes-Benz, Tesla, Toyota, Volkswagen, Volvo Cars, dan Volvo Group AB berpotensi memasukkan nikel dari Harita Nickel ke dalam rantai pasok mereka.[li] Operasi yang sudah ada saat ini, ditambah dengan potensi hampir tiga kali lipatnya jumlah fasilitas pengolahan HPAL serta peningkatan laju produksi tailing yang dihasilkan dari fasilitas yang telah memperoleh izin maupun yang masih diusulkan,

secara signifikan meningkatkan paparan perusahaan hilir terhadap risiko lingkungan dan hak asasi manusia.

Salah satu perusahaan yang secara langsung berinvestasi dalam pertumbuhan yang diproyeksikan ini adalah Ford Motor Company, yang pada Maret 2023 mengumumkan telah menandatangani perjanjian dengan PT Vale dan Huayou Cobalt untuk membangun Proyek Pomalaa Block High-Pressure Acid Leaching (HPAL) beserta fasilitas tailing yang difilter terkait, dengan operasi yang diperkirakan akan dimulai pada 2026.[lii]

Dampak-dampak tersebut, bersama dengan berbagai dampak lain yang telah didokumentasikan dalam rantai pasok mineral, telah memunculkan seruan luas dari para pemimpin masyarakat adat, komunitas lokal, dan organisasi masyarakat sipil agar diberlakukan undang-undang uji tuntas lingkungan dan hak asasi manusia yang bersifat wajib. Regulasi tersebut diharapkan dapat mewajibkan perusahaan-perusahaan di sektor hilir untuk mengidentifikasi dan menangani dampak dari kegiatan usaha mereka, tanpa memandang di mana dampak tersebut terjadi.[liii]

Rekomendasi Earthworks

Pemerintah Indonesia, perusahaan operator, pembeli di sektor hilir, serta lembaga keuangan harus segera mengambil tindakan untuk melindungi lingkungan, masyarakat, dan para pekerja dari risiko yang ditimbulkan oleh fasilitas penyimpanan tailing dari limbah HPAL**,** serta memulihkan dampak kerugian yang telah terjadi.

- **Pemerintah Indonesia** harus meminta pertanggungjawaban para perusahaan operator yang melakukan praktik-praktik berbahaya. Pemerintah perlu memberlakukan moratorium terhadap pembangunan dan penerbitan izin fasilitas baru sampai peraturan dipatuhi dan terdapat peningkatan dalam hal transparansi, standar keselamatan, pelibatan masyarakat, serta pengawasan. Pemerintah juga harus melakukan audit independen untuk memastikan bahwa fasilitas-fasilitas tersebut aman.
- **Perusahaan operator** harus menghentikan operasi HPAL di lokasi-lokasi di mana kegagalan fasilitas tailing telah terjadi atau berisiko segera terjadi. Mereka harus mengambil langkah untuk menghentikan atau memitigasi dampak yang merugikan, melibatkan masyarakat yang terdampak, serta memastikan adanya transparansi, pemantauan independen, dan pengawasan yang memadai.
- **Perusahaan otomotif** harus memulai investigasi internal terhadap risiko tailing dalam rantai pasok nikel mereka. Apabila hasil investigasi tersebut menunjukkan adanya kekhawatiran terkait keselamatan fasilitas tailing, perusahaan otomotif harus berkomunikasi dengan perusahaan pertambangan dan pengolahan nikel mengenai rencana mereka untuk meningkatkan keselamatan. Jika para

pemasok gagal memitigasi dan memulihkan dampak berbahaya, perusahaan otomotif harus secara bertanggung jawab menghentikan pembelian dari lokasi-lokasi tersebut.

- **Investor** juga harus melakukan investigasi internal terhadap risiko tailing dalam rantai pasok nikel mereka. Jika hasil investigasi tersebut menunjukkan adanya kekhawatiran terkait keselamatan fasilitas tailing dalam portofolio lembaga keuangan tersebut, para investor harus berkomunikasi dengan perusahaan pertambangan dan pengolahan nikel mengenai rencana mereka untuk meningkatkan keselamatan. Apabila kekhawatiran keselamatan tersebut tidak terselesaikan, investor harus menghentikan pendanaan untuk proyek-proyek tersebut.

Apabila pengelolaan tailing yang aman tidak dapat dijamin secara konsisten dan transparan, maka Pemerintah Indonesia seharusnya tidak memberikan izin bagi pembangunan fasilitas pengolahan HPAL baru maupun perluasan fasilitas yang sudah ada.

Rekomendasi Khusus

Lampiran A: Rekomendasi untuk Pemerintah Indonesia

Kepada lembaga-lembaga regulator di Indonesia, termasuk Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, Kementerian Perindustrian, Kementerian Pekerjaan Umum, serta Gubernur Maluku Utara dan Sulawesi Tengah

Pemerintah Indonesia harus meminta pertanggungjawaban para perusahaan operator yang ada atas praktik-praktik berbahaya. Pemerintah perlu memberlakukan moratorium terhadap pembangunan dan penerbitan izin fasilitas baru sampai peraturan dipatuhi dan terdapat peningkatan dalam hal transparansi, standar keselamatan, pelibatan masyarakat, serta pengawasan. Pemerintah juga harus melakukan audit independen untuk memastikan bahwa fasilitas-fasilitas tersebut aman.
Mengingat risiko yang ditimbulkan oleh operasi tailing yang difilter yang sudah ada, kami merekomendasikan rangkaian tindakan yang perlu segera dilakukan sebagai berikut:

- Untuk proyek PT HPL di Pulau Obi, PT QMB New Energy Materials, dan PT Huayue Nickel Cobalt di kawasan Indonesia Morowali Industrial Park (IMIP): memerintahkan pemilik proyek untuk menghentikan penimbunan tailing, mengingat adanya risiko kegagalan tailing secara katastrofik yang telah terdokumentasi, serta—khususnya untuk operasi di Pulau Obi—adanya pencemaran air.

- Untuk PT Huafei Nickel Cobalt di Indonesia Weda Bay Industrial Park (IWIP): memerintahkan pemilik proyek untuk menghentikan penimbunan tailing, karena fasilitas tersebut jauh melampaui batas teknologi yang telah terbukti aman dalam hal volume, ketinggian, dan kapasitas pengolahan tailing, jika dibandingkan dengan rata-rata curah hujan tahunan di wilayah tersebut, sehingga menimbulkan risiko yang tidak termitigasi terhadap lingkungan, masyarakat, dan pekerja.
- Melaksanakan audit keselamatan pada seluruh fasilitas penyimpanan tailing yang difilter yang ada di Indonesia dengan menggunakan perusahaan konsultan independen yang dipilih oleh Pemerintah Indonesia, tetapi biayanya ditanggung oleh pemilik fasilitas penyimpanan tailing. Perusahaan pertambangan dan pengolahan maupun pemangku kepentingan lainnya tidak boleh diizinkan mengubah hasil laporan audit.
    - Membuka kembali fasilitas penyimpanan tailing yang difilter yang sudah ada hanya apabila fasilitas tersebut memperoleh hasil audit keselamatan yang memuaskan serta mematuhi sistem pengawasan dan regulasi yang telah ditingkatkan.
- Memerintahkan penghentian sementara pengembangan lebih lanjut terhadap 12 proyek HPAL yang telah memperoleh izin dan/atau sedang dalam tahap pembangunan, serta memberlakukan moratorium penerbitan izin bagi 12 proyek HPAL yang masih berada pada tahap usulan, sampai persoalan keselamatan mendesak yang terkait dengan penyimpanan tailing ditangani, pengawasan pemerintah yang kuat dibangun, dan kesenjangan regulasi terkait limbah tambang diperbaiki. Ke depan, perijinan tidak diberikan bagi fasilitas-fasilitas di mana penyimpanan tailing yang aman tidak dimungkinkan.
- Menyusun regulasi tailing yang spesifik dan berdiri sendiri, serta menutup kesenjangan regulasi dalam peraturan perundang-undangan yang berkaitan dengan limbah tambang, seperti Undang-Undang No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Undang-Undang No. 32 Tahun 2014 tentang Perindustrian, Undang-Undang No. 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana, Undang-Undang No. 3 Tahun 2020 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara yang mengubah Undang-Undang No. 4 Tahun 2009, Undang-Undang No. 6 Tahun 2023 tentang Penetapan Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang No. 2 Tahun 2022 tentang Cipta Kerja menjadi Undang-Undang, Peraturan Pemerintah (PP) No. 37 Tahun 2010 tentang Bendungan, PP No. 27 Tahun 2020 tentang Pengelolaan Sampah Spesifik, PP No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, PP No. 28 Tahun 2021 tentang

Penyelenggaraan Bidang Perindustrian, serta Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 6 Tahun 2021 tentang Tata Cara dan Persyaratan Pengelolaan Bahan Berbahaya dan Beracun. Sebagian dari kesenjangan yang masih tersisa dapat diatasi dengan menerapkan panduan yang tercantum dalam *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management*, termasuk:

- Menyusun regulasi yang dikhususkan tentang tailing, serta menutup kesenjangan regulasi dalam peraturan perundang-undangan yang berkaitan dengan limbah tambang, seperti Undang-Undang No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Undang-Undang No. 32 Tahun 2014 tentang Perindustrian, Undang-Undang No. 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana, Undang-Undang No. 3 Tahun 2020 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara yang mengubah Undang-Undang No. 4 Tahun 2009, Undang-Undang No. 6 Tahun 2023 tentang Penetapan Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang No. 2 Tahun 2022 tentang Cipta Kerja menjadi Undang-Undang, Peraturan Pemerintah (PP) No. 37 Tahun 2010 tentang Bendungan, PP No. 27 Tahun 2020 tentang Pengelolaan Sampah Spesifik, PP No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, PP No. 28 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Bidang Perindustrian, serta Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 6 Tahun 2021 tentang Tata Cara dan Persyaratan Pengelolaan Bahan Berbahaya dan Beracun. Sebagian kesenjangan yang masih ada dapat diatasi dengan menerapkan panduan yang tercantum dalam *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management*, termasuk:
    - Mewajibkan pengusul proyek untuk memberikan bukti yang sangat kuat bahwa proyek yang diusulkan tidak akan menimbulkan dampak merugikan yang tidak dapat diterima terhadap lingkungan, masyarakat di sekitar, maupun para pekerja.
    - Meningkatkan kapasitas pejabat lingkungan hidup untuk melakukan inspeksi secara berkala, guna memastikan pengelolaan fasilitas tailing yang ada berjalan dengan aman, serta untuk menilai dampak sosial dan lingkungan serta tata kelola operasional fasilitas tersebut.
        a. Secara berkala mempublikasikan hasil inspeksi serta penilaian terhadap dampak sosial dan lingkungan dari fasilitas-fasilitas tersebut.

b. Meningkatkan kapasitas lembaga terkait untuk menegakkan pengenaan denda dan sanksi lainnya terhadap ketidakpatuhan terhadap regulasi, sesuai dengan ketentuan sanksi yang ditetapkan dalam hukum di Indonesia.

- Mewajibkan pemilik proyek dari seluruh fasilitas tailing untuk secara aktif melibatkan masyarakat di wilayah hilir yang berpotensi terdampak serta para pekerja dalam suatu proses perancangan bersama (co-design) terhadap rencana pengelolaan dan tanggap darurat, yang memrioritaskan keselamatan sekaligus menghormati hak dan preferensi masyarakat terkait relokasi.
    - Proses perancangan tersebut harus melibatkan masyarakat, para pekerja, serikat pekerja lokal, serta organisasi masyarakat setempat, dan
    - Disusun berdasarkan skenario kegagalan terburuk yang mungkin terjadi.
- Meningkatkan transparansi dan akses terhadap informasi mengenai fasilitas tailing dengan cara:
    - Menyediakan bagi masyarakat umum seluruh dokumen yang berkaitan dengan fasilitas tailing dan dampaknya**,** termasuk Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL).
    - Mewajibkan perusahaan pertambangan dan pengolahan untuk secara terbuka mengungkapkan lokasi seluruh fasilitas tailing serta seluruh informasi yang berkaitan dengan keselamatan dan stabilitas fasilitas tersebut. Dalam hal terjadi kegagalan fasilitas tailing, perusahaan harus segera memublikasikan lokasi kejadian, tanggal kejadian, jumlah tailing yang terlepas, serta dampak lingkungan dan sosial yang ditimbulkan.
    - Menyusun daftar nasional yang memuat bendungan tailing, yakni: nama, lokasi, ukuran, volume, usia, jenis konstruksi, serta klasifikasi tingkat bahaya dari seluruh fasilitas tailing yang aktif, tidak aktif, maupun yang telah ditutup.
- Menyusun dan menerapkan standar relokasi/pemindahan pemukiman yang sejalan dengan pedoman internasional dan yang memrioritaskan perlindungan masyarakat dari relokasi paksa atau perampasan lahan. Standar ini harus mewajibkan perusahaan untuk membuktikan bahwa relokasi merupakan satu-satunya pilihan yang layak, serta memastikan bahwa masyarakat hanya direlokasi apabila mereka telah dikonsultasikan dan diberikan pilihan untuk menolak relokasi.
    - Dalam kasus di mana masyarakat menyetujui relokasi, standar tersebut harus menetapkan proses partisipatif untuk menentukan kompensasi yang memadai, di mana masyarakat yang akan

direlokasi memiliki kewenangan akhir untuk menerima atau menolak ketentuan yang ditawarkan. Standar tersebut juga harus memastikan bahwa relokasi:

a. Meningkatkan mata pencaharian dan standar hidup masyarakat yang direlokasi. Kompensasi harus memperhitungkan tidak hanya nilai lahan, tetapi juga nilai produksi tanaman dan sumber penghidupan yang hilang.
b. Memperhitungkan waktu yang dibutuhkan untuk membangun kembali lahan pertanian, perekonomian lokal, dan sumber penghidupan lainnya.
c. Tidak menempatkan masyarakat di wilayah yang memiliki risiko bahaya.
d. Hanya dilaksanakan setelah seluruh kebutuhan kompensasi masyarakat telah dipenuhi sepenuhnya.

- Melibatkan serikat pekerja untuk meningkatkan standar Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3) bagi para pekerja tambang, termasuk penyusunan regulasi untuk memperbaiki infrastruktur keselamatan dan jalur evakuasi darurat.
- Mengkodifikasi larangan terhadap pembuangan tailing dalam bentuk cair (aqueous tailings disposal).

Lampiran B: Rekomendasi untuk Perusahaan Operator

Kepada perusahaan pertambangan dan pengolahan yang beroperasi di Indonesia Morowali Industrial Park (IMIP), Indonesia Weda Bay Industrial Park (IWIP), serta di dalam kompleks Harita Nickel di Pulau Obi, dan kepada perusahaan yang memiliki fasilitas HPAL yang diusulkan atau telah memperoleh izin

Perusahaan operator harus menghentikan operasi HPAL di lokasi-lokasi di mana kegagalan fasilitas tailing telah terjadi atau berisiko segera terjadi. Perusahaan juga harus mengambil langkah untuk menghentikan atau memitigasi dampak yang timbul**,** melibatkan masyarakat yang terdampak, serta memastikan transparansi, pemantauan independen, dan pengawasan yang memadai.

- Menyediakan akses informasi yang transparan mengenai risiko dan dampak fasilitas tailing guna memastikan penerapan kerangka kerja dan norma yang diakui secara internasional.
    - Mengungkapkan secara terbuka data yang akurat, rinci, dan berkualitas tinggi untuk menunjukkan keselamatan dan stabilitas seluruh fasilitas tailing, berdasarkan praktik terbaik yang diuraikan dalam *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management* serta dokumen panduan yang akan dikembangkan oleh Pemerintah Indonesia, termasuk namun tidak terbatas pada:

        a. Nama, lokasi, ukuran, volume, usia, jenis konstruksi, serta klasifikasi tingkat bahaya dari seluruh fasilitas tailing yang aktif, tidak aktif, maupun yang telah ditutup.
        b. Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL) pada tingkat fasilitas yang mencakup risiko lingkungan, rencana pengelolaan, serta langkah-langkah mitigasi**.**
        c. Analisis potensi jebolnya bendungan (Dam Breach Analysis) serta setiap pembaruan yang relevan.
        d. Rencana pengelolaan dan tanggap darurat, termasuk rincian mengenai bagaimana rencana tersebut disusun dan dikembangkan.
        e. Rencana penutupan fasilitas, beserta jumlah jaminan keuangan (financial bonding) yang dialokasikan**,** biaya tahunan untuk pemulihan lahan, serta perubahan dalam rencana pendanaan.
        f. Lokasi, tanggal kejadian, jumlah tailing yang terlepas, serta dampak lingkungan dan sosial dari setiap kegagalan fasilitas tailing. Informasi ini harus diperbarui secara berkala.
    - Menyediakan akses untuk mendapatkan ahli teknis independen bagi anggota masyarakat agar mereka dapat menilai seluruh data dan laporan yang menguraikan risiko yang ditimbulkan oleh fasilitas tailing. Masyarakat harus dapat memilih atau menyetujui ahli independen tersebut, namun biayanya harus ditanggung oleh perusahaan yang bertanggung jawab.
- Melibatkan masyarakat yang terdampak oleh fasilitas tailing, dengan menggunakan bahasa lokal dan cara yang mudah diakses, untuk memberikan informasi yang akurat, transparan, dan tepat waktu mengenai risiko, dampak, serta keselamatan dan stabilitas fasilitas tailing.
    - Secara aktif melibatkan seluruh masyarakat di wilayah hilir yang berpotensi terdampak dalam suatu proses perancangan bersama (co-design) terhadap rencana pengelolaan dan tanggap darurat yang memrioritaskan keselamatan, sambil tetap menghormati hak dan preferensi masyarakat terkait relokasi.
        a. Proses perancangan tersebut harus melibatkan masyarakat, pekerja, serikat pekerja lokal, dan organisasi masyarakat setempat, dan
        b. Disusun berdasarkan skenario kegagalan terburuk yang mungkin terjadi.
- Mengakui hak-hak budaya, wilayah, dan tata kelola sendiri masyarakat adat sebagaimana diatur dalam Deklarasi PBB tentang Hak-Hak Masyarakat Adat (UNDRIP) dan Konvensi ILO 169, dengan memastikan adanya protokol untuk

memperoleh PADIATAPA (Persetujuan Di Awal Tanpa Paksaan)[liv] bagi seluruh fasilitas tailing.

- Menerapkan mekanisme pengaduan independen di tingkat lokasi proyek, yang didasarkan pada Prinsip-Prinsip Panduan PBB tentang Bisnis dan Hak Asasi Manusia (UNGP), serta memastikan bahwa penyelesaian atas pengaduan yang diajukan bersifat memadai, efektif, dan tepat waktu.[lv]
- Secara sukarela dan transparan berpartisipasi dalam seluruh kegiatan pengawasan, pengelolaan, dan kepatuhan yang diwajibkan oleh Pemerintah Indonesia, termasuk namun tidak terbatas pada:
    - Menghentikan operasi pada fasilitas tailing yang difilter apabila diperintahkan untuk melakukannya.
    - Mematuhi seluruh peraturan perundang-undangan yang relevan.
- Menerapkan kebijakan yang memastikan bahwa relokasi masyarakat hanya dilakukan apabila ada persetujuan penuh mereka dan melalui proses partisipatif, di mana masyarakat yang akan direlokasi memiliki kewenangan akhir untuk merancang serta menerima atau menolak ketentuan relokasi tersebut. Perusahaan harus membuktikan bahwa tidak ada pilihan lain selain relokasi, tidak pernah melakukan relokasi paksa terhadap masyarakat, serta mengikuti standar pemerintah yang relevan terkait relokasi.
- Mengembangkan dan menerapkan program pemantauan kualitas air yang kuat di wilayah hilir dari seluruh fasilitas tailing yang:
    - Mengidentifikasi dan menguji seluruh sumber air yang berpotensi terkena pencemaran air.
    - Melibatkan partisipasi masyarakat dalam perancangan program, serta melatih dan melibatkan masyarakat sebagai pemantau kualitas air. Masyarakat harus dapat memilih perwakilan mereka sendiri dalam program tersebut.
    - Memantau kualitas air dengan frekuensi yang cukup untuk mendeteksi pencemaran secara tepat waktu.
    - Mengungkapkan secara terbuka hasil pemantauan, termasuk parameter pengujian dan data mentah, dalam seluruh bahasa lokal yang relevan.
    - Apabila kualitas air telah terdampak, melakukan perbaikan dan pemulihan kualitas air yang telah tercemar.
- Menerapkan kebijakan yang melarang penggunaan pembuangan tailing ke laut dalam (deep sea tailings disposal).

Mengingat risiko kegagalan katastrofik tailing yang telah terdokumentasi, serta—dalam kasus operasi di Pulau Obi—adanya pencemaran air, kami merekomendasikan agar PT Halmahera Persada Lygend di Pulau Obi, serta PT QMB New Energy Materials dan PT Huayue Nickel Cobalt yang beroperasi di Indonesia Morowali Industrial Park (IMIP):

- Menghentikan penimbunan tailing dan segera melibatkan seluruh masyarakat di wilayah hilir yang berpotensi terdampak dalam suatu

proses perancangan bersama (co-design) terhadap rencana pengelolaan dan tanggap darurat, yang memprioritaskan keselamatan sekaligus menghormati hak dan preferensi masyarakat terkait relokasi.

- Melakukan pemulihan secara menyeluruh terhadap wilayah-wilayah yang telah terdampak oleh tumpahan tailing dan runtuhnya bendungan**, serta** memberikan kompensasi kepada masyarakat dan para korban yang terdampak.

Mengingat bahwa fasilitas tailing milik PT Huafei Nickel Cobalt di Indonesia Weda Bay Industrial Park (IWIP) jauh melampaui batas teknologi yang telah terbukti aman dalam hal volume, ketinggian, dan kapasitas pengolahan tailing dibandingkan dengan rata-rata curah hujan tahunan di wilayah tersebut, sehingga menimbulkan risiko yang tidak termitigasi bagi lingkungan, masyarakat, dan pekerja, maka kami merekomendasikan agar perusahaan tersebut:

- Menghentikan penimbunan tailing dan segera melibatkan seluruh masyarakat di wilayah hilir yang berpotensi terdampak dalam suatu proses perancangan bersama (co-design) terhadap Rencana Pengelolaan dan Tanggap Darurat, yang memprioritaskan keselamatan sekaligus menghormati hak dan preferensi masyarakat terkait relokasi.

Lampiran C: Rekomendasi untuk Produsen Otomotif dan Pembeli di Sektor Hilir

Kepada produsen otomotif yang memperoleh pasokan nikel dari perusahaan-perusahaan yang beroperasi di Indonesia Morowali Industrial Park (IMIP), Indonesia Weda Bay Industrial Park (IWIP), dan Harita Nickel

Produsen otomotif harus memulai investigasi internal terhadap risiko tailing dalam rantai pasok nikel mereka. Apabila investigasi tersebut menunjukkan adanya kekhawatiran terkait keselamatan fasilitas tailing, produsen otomotif harus berkomunikasi dengan perusahaan pertambangan dan pengolahan nikel mengenai rencana mereka untuk meningkatkan keselamatan. Apabila para pemasok gagal memitigasi dan memulihkan dampak berbahaya, produsen otomotif harus secara bertanggung jawab menghentikan pengadaan dari lokasi-lokasi tersebut**.**

- **Produsen otomotif** harus memulai investigasi internal terhadap risiko tailing dalam rantai pasok nikel mereka, dengan memberikan perhatian khusus pada risiko spesifik yang terkait dengan tailing yang difilter dari proses HPAL, serta mempublikasikan komitmen berbatas waktu yang disusun bersama para pemasok mengenai bagaimana mereka akan memastikan bahwa pemasok mereka melaksanakan tindakan korektif. Tindakan korektif ini harus sesuai

dengan praktik terbaik internasional, seperti *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management*, dan proses ini harus mewajibkan perusahaan pertambangan dan pengolahan nikel untuk:

  - Mengungkapkan secara terbuka data yang rinci dan berkualitas tinggi mengenai fasilitas tailing mereka melalui laporan keberlanjutan, melalui Global Tailings Portal, atau melalui situs web perusahaan, termasuk misalnya: data yang akurat, rinci, dan berkualitas tinggi untuk menunjukkan keselamatan dan stabilitas seluruh fasilitas tailing, berdasarkan praktik terbaik yang diuraikan dalam *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management* serta dokumen panduan yang akan dikembangkan oleh Pemerintah Indonesia.
  - Mengungkapkan secara terbuka pada masyarakat data yang akurat, rinci, dan berkualitas tinggi untuk menunjukkan keselamatan dan stabilitas seluruh fasilitas tailing, berdasarkan praktik terbaik yang diuraikan dalam *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management*.
  - Mengambil seluruh langkah yang diperlukan untuk meningkatkan transparansi, menghentikan dan memulihkan dampak yang ditimbulkan terhadap masyarakat, pekerja, dan lingkungan oleh operasi fasilitas tailing yang difilter, memastikan bahwa operasi di masa depan menghindari dampak merugikan yang tidak dapat diterima, serta mematuhi seluruh regulasi pemerintah yang berlaku.
  - Menerapkan kebijakan yang melarang pembelian dari tambang atau fasilitas pengolahan yang menggunakan pembuangan tailing ke laut dalam (deep sea tailings disposal).
- Apabila produsen otomotif menemukan bahwa fasilitas dalam rantai pasok mereka terus gagal memitigasi dan memulihkan dampak berbahaya yang ditimbulkan, maka produsen otomotif harus mengakhiri hubungan bisnis tersebut, sesuai dengan Prinsip-Prinsip Panduan PBB tentang Bisnis dan Hak Asasi Manusia (UNGP) serta Pedoman OECD untuk Perusahaan Multinasional.
- Produsen otomotif harus meminta kepada Pemerintah Indonesia hasil audit keselamatan terhadap seluruh fasilitas penyimpanan tailing yang difilter yang ada.

To Ford Motor Company

Selain poin-poin yang telah disebutkan di atas, Ford Motor Company harus melakukan uji tuntas (due diligence) untuk memastikan bahwa pembangunan Proyek Pomalaa HPAL beserta fasilitas tailing terkait selaras dengan Prinsip-Prinsip Panduan PBB tentang Bisnis dan Hak Asasi Manusia (UNGP) serta komitmen kebijakan Ford untuk menghormati hak asasi manusia dan lingkungan. Hal ini termasuk menerapkan praktik

terbaik sebagaimana diuraikan dalam *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management*.

Lampiran D: Rekomendasi untuk Investor

Kepada para investor dan lembaga pembiayaan yang terlibat dalam kilang HPAL di Indonesia Morowali Industrial Park (IMIP), Indonesia Weda Bay Industrial Park (IWIP), dan Harita Nickel, serta pada fasilitas yang telah memperoleh izin maupun yang direncanakan, dan kepada otoritas regulator perbankan dan jasa keuangan nasional

Para investor harus memulai investigasi internal terhadap risiko tailing dalam rantai pasok nikel mereka. Apabila investigasi tersebut menunjukkan adanya kekhawatiran terkait keselamatan fasilitas tailing dalam portofolio lembaga keuangan tersebut, investor harus berkomunikasi dengan perusahaan pertambangan dan pengolahan nikel mengenai rencana mereka untuk meningkatkan keselamatan. Apabila kekhawatiran akan keselamatan tersebut tidak terselesaikan, para investor harus menghentikan pembiayaan terhadap proyek-proyek tersebut.

- Apabila berinvestasi pada fasilitas pertambangan dan pengolahan di Indonesia, para investor harus memulai investigasi internal terhadap risiko tailing dalam rantai pasok nikel mereka, dengan memberikan perhatian khusus pada risiko spesifik yang terkait dengan tailing yang difilter dari proses HPAL, serta mewajibkan fasilitas-fasilitas tersebut untuk mematuhi praktik terbaik internasional, seperti *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management*. Sebagai bagian dari hal tersebut, investor harus mewajibkan perusahaan pertambangan dan pengolahan nikel untuk:
    - Mengungkapkan secara terbuka data yang rinci dan berkualitas tinggi mengenai fasilitas tailing mereka melalui laporan keberlanjutan, melalui Global Tailings Portal, atau melalui situs web perusahaan, termasuk misalnya data yang akurat, rinci, dan berkualitas tinggi untuk menunjukkan keselamatan dan stabilitas seluruh fasilitas tailing, berdasarkan praktik terbaik yang diuraikan dalam *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management* serta dokumen panduan yang akan dikembangkan oleh Pemerintah Indonesia.
    - Melakukan langkah-langkah yang diperlukan untuk menghentikan dan memulihkan dampak yang ditimbulkan terhadap masyarakat, pekerja, dan lingkungan, memastikan bahwa operasi di masa depan menghindari dampak merugikan yang tidak dapat diterima, serta mematuhi seluruh regulasi pemerintah yang berlaku.
    - Berkomitmen untuk memastikan independensi audit-audit tersebut serta menerima hasilnya.

    - Menerapkan kebijakan yang berkomitmen untuk tidak melakukan pembelian dari tambang yang menggunakan pembuangan tailing ke laut dalam (deep sea tailings disposal).

- Apabila hasil audit tersebut menunjukkan adanya kekhawatiran terkait keselamatan fasilitas tailing dalam portofolio lembaga keuangan, para investor harus berkomunikasi dengan perusahaan pertambangan dan pengolahan nikel mengenai rencana mereka untuk meningkatkan keselamatan, dan apabila perusahaan tersebut tetap gagal memitigasi dan memulihkan dampak berbahaya yang ditimbulkan**,** maka pembiayaan terhadap proyek tersebut harus dihentikan.
- Para investor dan lembaga pembiayaan harus meminta kepada Pemerintah Indonesia hasil audit keselamatan yang dilakukan oleh perusahaan konsultan independen yang kredibel dan dipilih oleh Pemerintah Indonesia, untuk seluruh fasilitas penyimpanan tailing yang difilter yang ada dalam portofolio mereka.

Referensi

[i] IEA (2024). *Global Critical Minerals Outlook 2024*. Paris: International Energy Agency (IEA). Tersedia di: https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024.
Lisensi: CC BY 4.0.
[ii] USGS (U.S. Geological Survey) (2025a). *Nickel Statistics and Information*. Tersedia di: https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/nickel-statistics-and-information.
[iii] Angka-angka ini berbeda dari yang digunakan dalam laporan teknis Dr. Emerman, *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology*. Laporan Dr. Emerman mengutip proyeksi data USGS untuk tahun 2024. Ringkasan ini menggunakan total produksi aktual yang belum tersedia pada saat laporan Dr. Emerman disusun.
[iv] Emerman, Steven (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology*.
[v] Emerman, Steven (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology*.
[vi] Labiro, Richard (2025). *Sisi Gelap Transisi Energi: Bank-bank Pelat Merah di Balik Proyek-Proyek Nikel untuk Bahan Baku Baterai Kendaraan Listrik di Sulawesi Tengah*. Palu: Yayasan Tanah Merdeka.
[vii] Emerman, Steven. (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology.*
[viii] Emerman, Steven. (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology.*
[ix] Nangoy, Fransiska, dan Fathin Unguku. (5 Februari 2021). *Facing green pressure, Indonesia halts deep-sea mining disposal*. Reuters. Tersedia di: https://www.reuters.com/article/world/exclusivefacing-green-pressure-indonesia-halts-deep-sea-mining-disposal-idUSKBN2A50VG/
[x] Emerman, Steven. (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology.*
[xi] Emerman, Steven. (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology.*
[xii] Emerman, Steven. (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology.*
[xiii] Bodley, A.J., dan C. Vaguener. (2022). *Learnings from Dry Stacking Fine-Grained Nickel Residue in the Tropics.* Dalam Tailings and Mine Waste 2022, Denver, Colorado, November 2022, 9 hlm. Tersedia di: https://www.researchgate.net/publication/366093867_Learnings_from_Dry_Stacking_Fine_Grained_Nickel_Residue_in_the_Tropics.
[xiv] Baker, E., K. Thygesen, dan B. Haworth. (2025). *Mining and mine tailings in Asia—Moving towards adoption of the Global Industry Standard on Tailings Management.* GRID-Arendal, 68 hlm. Tersedia di: https://www.researchgate.net/publication/391739738_MINING_AND_MINE_TAILINGS_IN_ASIA_Moving_towards_adoption_of_the_Global_Industry_Standard_on_Tailings_Management.
[xv] Emerman, Steven. (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology.*
[xvi] Emerman, Steven. (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology.*
[xvii] Emerman, Steven. (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology.*
[xviii] Emerman, Steven. (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology.*
[xix] Emerman, Steven. (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology.*
[xx] Yayasan Tanah Merdeka. (23 Maret 2025). “Tentang Kecelakaan Kerja di Fasilitas Penyimpanan Limbah (Tailing) di PT Indonesia Morowali Industrial Park.” Pernyataan Pers; Yayasan Tanah Merdeka.

(8 April 2025). “Morowali di Bawah Ancaman Tailing Industri Nikel.” Pernyataan Pers. Ayu, Reny Sri. (24 Maret 2025). “Pekerja IMIP Tertimbun Longsor, 1 Tewas, 2 Hilang.” *Kompas.* Tersedia di: https://www.kompas.id/artikel/pekerja-imip-tertimbun-longsor-1-tewas-2-hilang.

[xxi] Yayasan Tanah Merdeka (2025, March 24); Yayasan Tanah Merdeka (2025, April 8); Kabar Sulteng (2025, March 23) “3 Pekerja Tertimbun Longsor di Kawasan PT IMIP, YTM Desak Evaluasi Menyeluruh” Kabar Sulteng. Tersedia di: https://www.kabarsulteng.id/2025/03/24/3-pekerja-tertimbun-longsor-di-kawasan-pt-imip-ytm-desak-evaluasi-menyeluruh/. Aryo Bhawono. (2025, April 22). “11,5 Juta Ton Limbah Tailing IMIP Ancam Sungai Bahodopi”. *Betahita.* Tersedia di: https://betahita.id/news/detail/11026/11-5-juta-ton-limbah-tailing-imip-ancam-sungai-bahodopi.html?v=1745280966. Riza Salman. (2025, April 8). “Kolam Limbah Nikel IMIP Jebol Tewaskan Tiga Pekerja”. *Mongabay.* Tersedia di: https://www.mongabay.co.id/2025/04/08/kolam-limbah-nikel-imip-jebol-dan-tewaskan-tiga-pekerja/.

[xxii] Spence, Eddy, dan Annie Lee. (18 Februari 2026). “Landslide at Morowali Nickel Hub Kills One Worker.” *Bloomberg.* Tersedia di: https://www.bloomberg.com/news/articles/2026-02-19/landslide-hits-indonesia-s-morowali-nickel-smelting-complex.

[xxiii] Ananda Teresia. (19 Februari 2026). “Landslide in Indonesia’s Morowali Nickel Hub Kills One, Halts Operations.” *Reuters.* Tersedia di: https://www.reuters.com/world/asia-pacific/landslide-indonesias-morowali-nickel-hub-kills-one-halts-operations-2026-02-19/.

[xxiv] Setiawan, Nano Verda. (19 Februari 2026). “Ada Longsor di Area Penimbunan Limbah IMIP, Manajemen Buka Suara.” *CNBC Indonesia.* Tersedia di: https://www.cnbcindonesia.com/news/20260219191337-4-712254/ada-longsor-di-area-penimbunan-limbah-imip-manajemen-buka-suara.

[xxv] Setiawan, Nano Verda. (19 Februari 2026). “Ada Longsor di Area Penimbunan Limbah IMIP, Manajemen Buka Suara.” *CNBC Indonesia.* Tersedia di: https://www.cnbcindonesia.com/news/20260219191337-4-712254/ada-longsor-di-area-penimbunan-limbah-imip-manajemen-buka-suara.

[xxvi] Emerman, Steven. (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology.*

[xxvii] Tan, Rebecca, Dera Menra Sijabat, dan Joshua Irwandi. (10 Mei 2023). “To Meet EV Demand, Industry Turns to Technology Long Deemed Hazardous.” *The Washington Post.* Tersedia di: https://www.washingtonpost.com/world/interactive/2023/ev-nickel-refinery-dangers/.

[xxviii] Moskowitz, Eli, Alon Aviram, Serdar Vardar, dan Kiyo Dörrer. (30 April 2025). “Major Nickel Supplier Harita Knew About Water Contamination at Indonesian Operation for a Decade.” *Organized Crime and Corruption Reporting Project (OCCRP).* Tersedia di: https://www.occrp.org/en/investigation/major-nickel-supplier-harita-knew-about-water-contamination-at-indonesian-operation-for-a-decade.

[xxix] Emerman, Steven. (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology.*

[xxx] Moskowitz, Eli, Alon Aviram, Serdar Vardar, dan Kiyo Dörrer. (30 April 2025). “Major Nickel Supplier Harita Knew About Water Contamination at Indonesian Operation for a Decade.” *Organized Crime and Corruption Reporting Project (OCCRP).* Tersedia di: https://www.occrp.org/en/investigation/major-nickel-supplier-harita-knew-about-water-contamination-at-indonesian-operation-for-a-decade

[xxxi] WALHI Sulawesi Selatan. (24 Februari 2023). “Submission for Special Rapporteur’s Thematic Report on Detoxification/Decarbonization: Report on Heavy Metal Pollution in Rivers and Community Water Sources Due to PT Vale Indonesia's Nickel Mining and Smelters in the Context of Higher Demand of Battery Material.” Tersedia di: https://www.ohchr.org/sites/default/files/documents/issues/toxicwastes/cfis/detoxdecarb/submission-detoxification-of-climate-solutions-ngo-walhi-2.docx.

[xxxii] Friends of the Earth Japan dan WALHI Sulawesi Tengah. (Januari/Februari 2024). “Water Quality Tests Surrounding Nickel Smelters and Mining Development Projects in Morowali, Indonesia.”

[xxxiii] Milanez, B., dkk. (2019). *Minas não há mais: Avaliação dos aspectos econômicos e institucionais do desastre da Vale na bacia do rio Paraopeba.* Versos - Textos para Discussão PoEMAS, 3(1), 1–114. Tersedia di: https://www2.ufjf.br/poemas/files/2017/04/Milanez-2019-Minas-n%C3%A3o-h%C3%A1-mais-versos.pdf.
[xxxiv] Didi, Faisal. (30 Januari 2025). "Dua Karyawan Meninggal Dunia, Polres Halmahera Tengah Lidik Kecelakaan Kerja di Perusahaan Tambang." *TribunTernate.com.* Tersedia di: https://ternate.tribunnews.com/2025/01/30/dua-karyawan-meninggal-dunia-polres-halmahera-tengah-lidik-kecelakaan-kerja-di-perusahaan-tambang.
[xxxv] Emerman, Steven. (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology.*
[xxxvi] Lahay, Sarjan, dan Dedi. (1 November 2024). "Kecelakaan Kerja Berulang di Kawasan Industri PT IMIP, Desak Pemerintah Tindak Tegas." *Mongabay Indonesia.* Tersedia di: https://www.mongabay.co.id/2024/11/01/kecelakaan-kerja-berulang-di-kawasan-industri-imip-desak-pemerintah-tindak-tegas/.
[xxxvii] Ucok, Supriyanto. (16 Mei 2025). "7 Pekerja Tewas, YTM Soroti Buruknya SMK3 di Kawasan Industri Tambang Sulteng." *Tribun News.* Tersedia di: https://palu.tribunnews.com/2025/05/16/7-pekerja-tewas-ytm-soroti-buruknya-smk3-di-kawasan-industri-tambang. Montesori, Jeis. (16 Mei 2025). "Sepanjang Januari–Mei 2025: Delapan Kecelakaan Kerja di Kawasan PT IMIP, Tujuh Pekerja Tewas." *Indotren.* Tersedia di: https://www.indotren.com/nasional/32215162646/sepanjang-januarimei-2025delapan-kecelakaan-kerja-di-kawasan-pt-imip-tujuh-pekerja-tewas.
[xxxviii] China Labor Watch. (28 Juni 2024). "Forged in Silence – The Untold Stories of Chinese Workers at Indonesia's Nickel Plants." Tersedia di: https://www.youtube.com/watch?v=x0W1hotmIYs.
[xxxix] Earthworks. *Ditch Ocean Dumping.* Tersedia di: https://earthworks.org/campaigns/ditch-ocean-dumping/.
[xl] Emerman, Steven. (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology.*
[xli] Morese, I. (18 Mei 2020). "Indonesian Miners Eyeing EV Nickel Boom Seek to Dump Waste into the Sea." *Mongabay.* Tersedia di: https://news.mongabay.com/2020/05/indonesian-miners-eyeing-ev-nickel-boom-seek-to-dump-waste-into-the-sea/. Emerman, Steven. (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology.*
[xlii] Lygend Resources. (17 Juni 2025). "First Wet-Discharge Pond in Indonesia's Nickel Industry Completed as Green Benchmark." Tersedia di: https://www.lygend.com/en/news/detail/1145.
[xliii] Global Tailings Portal. Diakses pada 28 Juli 2025. Tersedia di: https://tailing.grida.no/.
[xliv] Lygend Resources. (17 Juni 2025). "First Wet-Discharge Pond in Indonesia's Nickel Industry Completed as Green Benchmark." Tersedia di: https://www.lygend.com/en/news/detail/1145.
[xlv] Bowker, Lindsay Newland, dan David Chambers. (21 Juli 2015). "The Risk, Public Liability, & Economics of Tailings Storage Facility Failures." Tersedia di: https://earthworks.org/assets/uploads/2018/12/44-Bowker-Chambers.-2015.-Risk-Public-Liability-Economics-of-Tailings-Storage-Facility-Failures.pdf.
[xlvi] Giljum, S., dkk. (Mei 2025). *Driving Change, Not Deforestation: How Europe Could Mitigate the Negative Impacts of Its Transport Transition.* FERN, Rainforest Foundation Norway, The négaWatt Association, dan Institute for Ecological Economics, WU Vienna University of Economics and Business, hlm. 13. Tersedia di: https://www.fern.org/fileadmin/uploads/fern/Documents/2025/2025_Driving-change-not-deforestation-Report.pdf.

[xlvii] Moore, Ellen. (27 Juni 2025). "Nickel Waste Floods Homes in Indonesia Sparking Protests." *Earthworks.* Tersedia di: https://earthworks.org/blog/nickel-waste-floods-homes-in-indonesia-sparking-protests/.
[xlviii] Emerman, Steven. (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology.*
[xlix] Emerman, Steven. (29 Juni 2025). *Filtered Tailings in Indonesia: The Catastrophic Failure of a Disruptive Technology.*
[l] Business and Human Rights Resource Centre. (Juli 2024). *Powering Electrical Vehicles: Human Rights Impacts of Indonesia's Nickel Rush.* hlm. 14. Tersedia di: https://media.business-humanrights.org/media/documents/2024_EV_supply_chains.pdf.
[li] The Gecko Project. (30 Mei 2025). "Clean Cars Poisoned Water: A Nickel Titan's Toxic Secret." Tersedia di: https://thegeckoproject.org/articles/clean-cars-poisoned-water/.
[lii] Ford Motor Company. (30 Maret 2023). "PT Vale Indonesia and Huayou Sign Nickel Agreement with Ford Motor Co. Supporting Growth of the Global Sustainable EV Industry." Tersedia di: https://www.fromtheroad.ford.com/us/en/articles/2023/pt-vale-indonesia-and-huayou-sign-nickel-agreement-with-ford-mot (diakses pada 19 Mei 2025).
[liii] Business and Human Rights Resource Centre. *Mandatory Due Diligence Portal.* Tersedia di: https://www.business-humanrights.org/en/big-issues/mandatory-due-diligence/.
[liv] United Nations. (13 September 2007). *United Nations Declaration on the Rights of Indigenous Peoples.* Resolusi Majelis Umum PBB A/RES/61/295. Tersedia di: https://www.un.org/development/desa/indigenouspeoples/wp-content/uploads/sites/19/2018/11/UNDRIP_E_web.pdf.
[lv] Federal Institute for Sustainable Development. (2018). "Toolbox for Operational-Level Grievance Mechanisms". Tersedia di: https://business-humanrights.be/remedy-mechanisms?tab=grievance - olgm.

Tailing yang Difilter di Indonesia: Kegagalan Katastropik dari Sebuah Teknologi Disruptif

Steven H. Emerman, Malach Consulting, 785 N 200 W, Spanish Fork, Utah 84660, AS, Email: SHEmerman@gmail.com, Tel: 1-801-921-1228

Laporan disusun atas permintaan Earthworks, dikirim pada 8 Juni 2025, direvisi pada 29 Juni 2025

PERNYATAAN PENYANGKALAN

Sebagian dari analisis dalam laporan ini bersumber pada bocoran data. Earthworks meyakini bahwa penggunaan dokumen-dokumen ini memenuhi syarat untuk digunakan bagi kepentingan publik, termasuk untuk menyoroti potensi pelanggaran hak asasi manusia, kerusakan lingkungan, dan kesenjangan dalam tata kelola sumber daya.

ABSTRAK

Dari tahun 2015 hingga 2024, produksi tahunan nikel di Indonesia meningkat dari 130.000 menjadi 2.200.000 ton metrik, naik dari 5,7% menjadi 59,5% dari total produksi dunia. Lonjakan drastis ini sebagian dicapai melalui pembukaan tujuh proyek high-pressure acid leaching (HPAL) untuk mengekstraksi endapan hidroksida campuran nikel dan kobalt dari bijih laterit, yang dimulai antara tahun 2021 hingga 2025. Proyek-proyek tersebut meliputi PT Halmahera Persada Lygend (HPL) dan PT Obi Nickel Cobalt (ONC) di Pulau Obi; PT Qing Mei Bang (QMB) New Energy Materials, PT Huayue Nickel Cobalt (HYNC), PT ESG New Energy Material, dan PT Meiming New Energy Material di kawasan Indonesia Morowali Industrial Park di Pulau Sulawesi; serta PT Huafei Nickel Cobalt (HFNC) di kawasan Weda Bay Industrial Park di Pulau Halmahera. Aspek inovatif dari ledakan proyek HPAL di Indonesia adalah penggabungan teknologi HPAL dengan tailing yang difilter. Semua proyek HPAL sebelumnya menggunakan fasilitas penyimpanan tailing konvensional, kecuali proyek Ramu di Papua Nugini yang menggunakan pembuangan tailing ke laut dalam (*deep sea tailings disposal*). Kombinasi ini dimotivasi oleh kebutuhan akan nikel untuk kendaraan listrik ditambah dengan pilihan alternatif yang lebih ramah lingkungan berupa tailing yang difilter untuk menciptakan paket "hijau" yang utuh. Teknologi disruptif adalah inovasi yang pada awalnya tampak inferior, tetapi dengan cepat menggantikan teknologi yang sudah ada. Moto "Bergerak cepat dan hancurkan sesuatu" telah dikaitkan dengan berbagai pendukung teknologi disruptif, yang mencerminkan dua sisi dari kreativitas dan tindakan tanpa mempertimbangkan konsekuensinya. Laporan ini mengajukan tesis bahwa ledakan cepat proyek HPAL dan tailing yang difilter di Indonesia merupakan contoh dari teknologi disruptif sekaligus kegagalan yang katastropik.

Kapasitas tahunan dari tujuh proyek HPAL yang ada saat ini adalah antara 405.000 hingga 26.500 ton metrik nikel dan kobalt. Ada 14 proyek HPAL yang telah mendapatkan izin dan/atau sedang dalam tahap konstruksi, termasuk delapan proyek baru di Kawasan Industri Morowali, dengan kapasitas tahunan gabungan sebesar 850.900 ton metrik nikel dan kobalt. Sebanyak 12 proyek HPAL lainnya berada dalam tahap proposal, dengan kapasitas gabungan sebesar 745.900 ton metrik nikel per tahun. Berdasarkan produksi sebesar 50.000, 6.500, dan 7.496.050 ton metrik nikel, kobalt, dan tailing, masing-masing di proyek PT HPL tahun 2023,

rasio tailing HPAL terhadap logam adalah 133. Dengan demikian, tingkat produksi tahunan tailing HPAL oleh semua proyek yang beroperasi, yang beroperasi ditambah yang telah diizinkan, serta yang beroperasi ditambah yang telah diizinkan dan yang masih dalam tahap proposal adalah masing-masing sebesar 57, 176, dan 275 juta ton metrik per tahun. Kandungan air geoteknikal yang disasar untuk tailing HPAL adalah 30-35%, hal itu berarti penggunaan nama "Fasilitas Tailing Kering (*Dry Stack Tailings Facility* / DSTF)" untuk fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di proyek PT HPL hanyalah istilah pemasaran semata. Mengingat kecenderungan bahwa curah hujan tinggi dapat menjenuhkan tailing yang difilter, tingkat curah hujan menjadi kendala utama terkait ketinggian, volume penyimpanan, dan kapasitas pengolahan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter. Berdasarkan rerata curah hujan tahunan sebesar 2252, 2241, dan 1754 mm; kapasitas penyimpanan masing-masing sebesar 67, 33, dan 25,8 juta meter kubik; serta keluaran masing-masing sebesar 28.356, 49.041, dan 20.537 ton metrik per hari untuk proyek Sonic Bay, PT HFNC, dan PT HPL, serta tinggi 57 meter untuk proyek PT HPL, ketiga proyek tersebut berada jauh di luar batas kemampuan teknologi saat ini.

Sebuah laporan yang dirilis pada tahun 2022 oleh SRK Consulting untuk proyek PT HPL di Pulau Obi mendokumentasikan kontaminasi air tanah akibat rembesan dari DSTF. Meskipun fasilitas tersebut telah beroperasi selama 1,5 tahun, sebagian dari infrastruktur drainase belum dibangun, dan tidak jelas bagaimana infrastruktur tersebut semestinya berfungsi bahkan setelah fasilitas didesain sekalipun. Artinya, kontaminasi air tanah telah menjadi bagian dari desain DSTF dan tidak ada laporan yang tersedia yang menyebutkan keberadaan pelapis anti-rembesan (*liner*). Laporan tahun 2020 oleh PT Lapi ITB menghitung bahwa sebanyak 29.326 meter kubik air yang tercemar akan meresap ke akuifer bawah tanah setiap tahunnya, dan mensimulasikan penyebaran kontaminan selama 100 tahun ke depan. PT Lapi ITB juga memprediksi kenaikan muka air tanah di DSTF yang akan terjadi akibat lambatnya rembesan mengalir keluar menuju sistem air tanah. Laporan tahun 2020 oleh Hatch memprediksi bahwa DSTF akan menjadi tidak stabil jika muka air tanah naik hingga 30 meter dari puncak tumpukan tailing. Baik PT Lapi ITB maupun Hatch sama-sama menunjukkan bahwa tailing yang difilter cukup rentan terhadap likuifaksi. PT Lapi ITB juga memprediksi bahwa, sebagai respons terhadap aktivitas seismik, fondasi akan menjadi tidak stabil dan penahan batuan (*rockfill buttresses*) akan menjadi tidak stabil jika tingginya melebihi 15 meter, yang bisa menjadi alasan mengapa desain menuntut tumpukan tailing jauh lebih tinggi daripada puncak penahan. Akhirnya, PT Lapi ITB memprediksi bahwa bagian-bagian dari DSTF akan menjadi tidak stabil apabila terjadi aktivitas seismik ketika merespon tingkat produksi tailing yang diperkirakan.

SRK Consulting menyediakan semua informasi yang diperlukan untuk sampai pada kesimpulan bahwa, pada Desember 2022, DSTF berada dalam bahaya kegagalan berujung bencana atau katastrofik. DSTF disinyalir telah dibangun tanpa pengendalian mutu terhadap kandungan air geoteknik tailing atau kerapatan pemadatan. Meskipun kandungan air yang ditargetkan adalah 35%, kandungan air aktual bervariasi antara 8 hingga 36%, dan kerapatan pemadatan berkisar antara 0,93 hingga 2,20 ton metrik per meter kubik. Karena densitas tailing yang rendah, DSTF diperkirakan akan mencapai kapasitas penuh pada pertengahan tahun 2027, meskipun rencana penutupan masih dalam tahap konseptual. SRK Consulting juga mencatat tidak adanya data pemantauan dan menggambarkan kegagalan DSTF sebagai "risiko yang tidak terkendali." Bahkan jika pengendalian mutu yang sempurna diterapkan mulai tahun 2023, penambahan tailing baru akan meningkatkan kemungkinan bahwa lapisan bawah DSTF akan mengalami pemadatan tiba-tiba yang dapat mengarah pada likuifaksi dan kegagalan katastrofik.

Laporan para konsultan menyampaikan suatu model deterministik tentang konsekuensi dari kegagalan DSTF, menurut model ini, tailing akan mengalir sejauh 2200 meter, bahkan jika tailing tersebut sepenuhnya mengalami likuifaksi. Sebaliknya, dalam suatu model statistik diprediksikan bahwa tailing akan mengalir sejauh 47 kilometer dalam skenario yang paling mungkin, sehingga diperkirakan tailing pada akhirnya akan mencapai laut. Model deterministik menunjukkan area banjir dengan genangan tidak beraturan yang berhenti kurang dari satu kilometer dari Laut Maluku, yang biasanya menunjukkan model topografi yang salah. Area genangan tersebut berpotongan dengan sungai yang mengalir ke barat sekitar 570 meter dari kaki DSTF, sehingga kemungkinan besar tailing akan mengalir ke barat sepanjang sungai sejauh 1600 meter menuju laut, dengan dampak signifikan terhadap infrastruktur dan pekerja, serta desa Kawasi. Belajar dari kegagalan dua tumpukan tailing yang difilter di Brasil baru-baru ini, tailing dapat mengalir sejauh 20 kali tinggi tumpukan hanya melalui longsoran padat (*solid slumping*), sehingga begitu tailing mencapai sungai, massa yang benar-benar cair akan berkembang sekalipun pada awalnya tidak terjadi likuifaksi pada tailing yang difilter.

Terlepas dari peringatan serius yang disampaikan dalam laporan SRK Consulting, rangkaian revisi menunjukkan bahwa peringatan tersebut secara bertahap telah dihaluskan dan bahkan beberapa informasi penting dihapus. Revisi 1 menyertakan foto besar dengan judul "Pemandangan area DSTF **dengan genangan air yang signifikan**" (penekanan ditambahkan). Revisi 1 juga menyatakan, "**Selama kunjungan lapangan, tampaknya terdapat beberapa masalah terkait genangan air dan drainase yang buruk**… Desain mengasumsikan bahwa pemadatan pada tailing akan cukup untuk mencegah likuifaksi; namun, menurut pendapat SRK, mengingat tinggi fasilitas (57 m), kurangnya pengendalian mutu dalam penempatan tailing, **serta adanya masalah air permukaan yang diamati**, maka perlu dilakukan studi lanjutan" (penekanan ditambahkan). Pada Revisi terakhir (Revisi 9), foto tersebut dibuat jauh lebih kecil, judulnya menjadi "Pemandangan area fasilitas tailing kering," dan dalam kutipan utama, baik kalimat "Selama kunjungan lapangan, tampaknya terdapat beberapa masalah genangan air dan drainase" maupun frasa " serta adanya masalah air permukaan yang diamati" telah dihapus. Genangan air di permukaan merupakan masalah yang sangat serius karena terdapat indikasi bahwa sesungguhnya seluruh tumpukan tersebut bisa saja jenuh. Menurut PT Lapi ITB, jika DSTF jenuh hingga 80% dari tinggi tumpukan, fasilitas ini harus diklasifikasikan ke dalam Level Darurat 3, yang berarti "Kegagalan segera atau aktual yang memerlukan evakuasi parsial atau total, komunikasi darurat serta tindakan-tindakan untuk merespon."

Kegagalan katastrofik dari fasilitas-fasilitas semacam ini terus berlangsung di Pulau Sulawesi. Pada 16 Maret 2025, fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT HYNC mengalami kegagalan akibat likuifaksi dan tailing yang dilepaskan mengalir ke Sungai Bahodopi menuju Laut Banda. Pada 21 Maret 2025, terjadi tanah longsor di fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT QMB yang berdekatan, mengakibatkan tiga pekerja tambang tewas. Pada 27 Maret 2025, tumpukan bijih runtuh di proyek PT QMB, menyebabkan alat berat terkubur, namun tidak ada korban jiwa. Longsor terbaru di fasilitas penyimpanan tailing yang difilter PT QMB terjadi pada 30 April 2025, tanpa laporan korban jiwa. Insiden-insiden ini menjadi bukti bahwa lebih banyak kegagalan telah terjadi di fasilitas tailing yang difilter, bahkan dari citra satelit tercatat dari 3 Januari 2025 terjadi longsoran yang jelas dari fasilitas PT HYNC dengan saluran-saluran yang terdefinisi untuk aliran tailing menuju Sungai Bahodopi. Tanggapan dari PT QMB adalah bahwa hujan yang memicu longsor mematikan tersebut adalah peristiwa 50

tahunan dan karena itu “di luar kendali manusia,” meskipun fasilitas tailing yang berpotensi menyebabkan hilangnya nyawa seharusnya dirancang untuk menahan peristiwa 10.000 tahunan.

Berbagai skenario ke depan tampaknya dipenuhi dengan bahaya. Skenario pertama adalah bahwa perusahaan tambang akan beralih dari tailing yang difilter ke fasilitas penyimpanan tailing konvensional. Faktanya, per Desember 2022, PT HPL telah mengajukan izin untuk membangun tiga bendungan tailing konvensional di Pulau Obi dengan total luas 1.556 hektar, dibandingkan dengan 195 hektar yang ditempati oleh DSTF. Skenario kedua adalah bahwa perusahaan tambang akan bersikeras atas hak untuk membuang tailing HPAL langsung ke laut. Skenario ketiga adalah bahwa fasilitas penyimpanan tailing yang difilter akan dibangun dengan jejak lahan yang besar dan ketinggian rendah untuk meminimalkan kemungkinan kegagalan katastrofik. Menurut para pekerja di PT ONC, rencananya adalah untuk menyimpan 132 juta ton metrik tailing yang difilter di atas lahan seluas 2.344 hektar, dengan tinggi yang dihitung kurang dari 3 meter, sehingga keruntuhan dapat dihindari dengan memaksimalkan penghancuran hutan.

Meski tergambar adanya berbagai ancaman ke depannya, ada sebuah alternatif. Kesimpulan bahwa kombinasi teknologi HPAL dan tailing yang difilter tidak berhasil di Indonesia dinilai terlalu dangkal karena belum jelas apakah memang ada yang benar-benar mencoba dan membuktikan teknologi disruptif ini berhasil. Khususnya, kurangnya pengendalian mutu atau pemantauan tidak akan berhasil bahkan jika diterapkan pada tumpukan tailing difilter yang pendek di iklim paling kering sekalipun. Rekomendasi yang mendesak dari laporan ini adalah harus ada tindakan yang diambil untuk melindungi keselamatan pekerja tambang dan penduduk komunitas di hilir DSTF proyek PT HPL di Pulau Obi. Rekomendasi jangka panjangnya adalah bahwa kombinasi teknologi HPAL dan tailing yang difilter harus tetap dilanjutkan, namun dengan memperhatikan prinsip keselamatan secara sungguh-sungguh. Secara khusus, Indonesia harus menyusun pedoman konstruksi aman untuk fasilitas penyimpanan tailing yang difilter yang sesuai dengan konteks Indonesia, dan komitmen kepatuhan terhadap pedoman tersebut harus menjadi prasyarat bagi pengoperasian fasilitas tailing yang difilter di masa depan.

DAFTAR ISI

PERNYATAAN PENYANGKALAN ***26***

ABSTRAK ***26***

RINGKASAN EKSEKUTIF ***31***

IKHTISAR ***39***

TUTORIAL MENGENAI ASPEK-ASPEK PENTING PERTAMBANGAN DI INDONESIA ***60***

Bijih Laterit dan Pelindian Asam Tekanan Tinggi *60*
Alternatif untuk Pembuangan Tailing Tambang *61*
Likuifaksi *66*
Teknologi Limbah Tailing yang Difilter *69*
Metode Keseimbangan Batas dan Faktor Keamanan *81*
Model Deterministik vs. Statistik untuk Analisis Kegagalan Fasilitas Tailing *83*
Drainase Asam Tambang dan Pelindian Logam *90*
Regulas Tailing di Indonesia *92*
Safety First: Panduan Pengelolaan Tailing Tambang yang Bertanggungjawab *96*

RINGKASAN FASILITAS PENYIMPANAN LIMBAH TAILING YANG DIFILTER DI INDONESIA ***100***

BATAS TEKNOLOGI SAAT INI UNTUK TAILING YANG DIFILTER ***111***

PULAU OBI: ANCAMAN KERUNTUHAN KATASTROFIK YANG NYATA ***122***

Kontaminasi Air Tanah *122*
Kerentanan terhadap Likuifaksi *129*
Kurangnya Pengendalian Mutu, Pemantauan, dan Kepatuhan terhadap Desain *138*
Minimnya Rencana Penutupan *142*
Ketidakrealistisan dalam Analisis Kerusakan Bendungan *143*
Genangan Permukaan dan Pembiaran *146*
Kepatuhan terhadap Regulasi Indonesia *154*
Fasilitas Tailing yang Tidak Stabil *154*

PULAU SULAWESI: KEGAGALAN KATASTROFIK YANG SEDANG BERLANGSUNG ***158***

Likuefaksi dan Tumpahan Tailing pada 16 Maret 2025 *158*
Longsor Tailing dan Korban Jiwa Pekerja pada 21 Maret 2025 *163*
Runtuhnya Timbunan Bijih pada 27 Maret 2025 *166*
Longsor Tailing pada 30 April 2025 dan Longsor Sebelumnya *167*
Tanggapan Pemerintah dan Perusahaan terhadap Keruntuhan Katastropik *169*

SKENARIO BERBAHAYA YANG TERBENTANG DI DEPAN ***173***

SKENARIO ALTERNATIF KE DEPAN ***177***

REKOMENDASI ***177***

TENTANG PENULIS ***178***

REFERENSI ***179***

RINGKASAN EKSEKUTIF

Dari tahun 2015 hingga 2024, produksi nikel tahunan dari pertambangan di Indonesia meningkat dari 130.000 menjadi 2.200.000 ton metrik, naik dari 5,7% menjadi 59,5% dari total produksi tambang dunia. Seiring dengan itu, dari tahun 2020 hingga 2024, produksi kobalt tahunan dari pertambangan di Indonesia meningkat dari 1.100 menjadi 28.000 ton metrik, dari 1,1% menjadi 9,7% dari total produksi global. Lonjakan dramatis ini sebagian dicapai melalui pembukaan lima proyek *Pelindian Asam Tekanan Tinggi* (HPAL) pada periode 2021 hingga 2024, yang bertujuan mengekstraksi presipitat hidroksida campuran nikel dan kobalt dari bijih laterit (tanah lapukan dalam yang mengeras). Kelima proyek HPAL tersebut meliputi: PT Halmahera Persada Lygend (HPL) dan PT Obi Nickel Cobalt (ONC) di Pulau Obi, Provinsi Maluku Utara; PT Qing Mei Bang (QMB) New Energy Materials dan PT Huayue Nickel Cobalt (HYNC) di Kawasan Industri Morowali, Sulawesi Tengah; serta PT Huafei Nickel Cobalt (HFNC) di Kawasan Industri Weda Bay, Pulau Halmahera, Maluku Utara. Proyek HPAL keenam dan ketujuh—PT ESG New Energy Material dan PT Meiming New Energy Material—beroperasi mulai Januari dan kuartal pertama tahun 2025 di Kawasan Industri Morowali. Proyek HPL, yang merupakan proyek HPAL pertama di Indonesia dan dibuka pada tahun 2021, juga menjalankan langkah tambahan berupa pengolahan presipitat hidroksida campuran menjadi sulfat nikel dan sulfat kobalt.

Penggunaan teknologi HPAL untuk mengolah bijih laterit bukanlah hal baru, bahkan di wilayah tropis dengan curah hujan tinggi. Sebanyak 11 proyek HPAL telah dibuka sebelum proyek pertama di Indonesia, termasuk proyek Coral Bay (2005) dan Taganito (2013) di Filipina, proyek Goro (2009) di Kaledonia Baru, serta proyek Ramu (2012) di Papua Nugini. Inovasi utama dalam gelombang ekspansi proyek HPAL di Indonesia saat ini adalah penggabungan teknologi HPAL dengan teknologi tailing yang difilter—praktik yang diterapkan di semua proyek HPAL di Indonesia. Tailing adalah partikel batuan basah dan hancur yang tersisa setelah material yang bernilai, seperti presipitat hidroksida campuran nikel dan kobalt, diekstraksi dari bijih. Dalam teknologi tailing yang difilter, tailing disaring untuk mengurangi kadar air geoteknis hingga ke tingkat yang memungkinkan pemadatan di fasilitas penyimpanan tailing yang difilter. Teknologi ini dianggap sebagai praktik terbaik karena menurunkan risiko likuifaksi dan keruntuhan fasilitas, mengurangi dampak jika keruntuhan terjadi, memperkecil jejak lahan fasilitas, mempermudah penutupan akhir yang aman, serta menurunkan konsumsi air dalam operasi pertambangan secara keseluruhan.

Alternatif dari teknologi tailing difilter adalah penyimpanan tailing basah di atas permukaan tanah dalam fasilitas penyimpanan tailing konvensional. Semua proyek HPAL sebelumnya menggunakan fasilitas konvensional, kecuali proyek Ramu di Papua Nugini yang menggunakan metode pembuangan tailing laut dalam. Pembuangan tailing ke laut tidak direkomendasikan dalam kondisi apa pun, dan pemerintah Indonesia telah menyatakan bahwa tidak akan menerbitkan izin baru untuk praktik ini, meskipun regulasi nasional masih membolehkannya. Demikian pula, pembuangan tailing langsung ke sungai atau badan air alami lainnya tidak disarankan dalam kondisi apa pun.

Belum ada studi yang menyimpulkan bahwa tailing HPAL ideal untuk penerapan teknologi penyaringan tailing—terutama di iklim tropis dengan tingkat kegempaan tinggi seperti di Indonesia. Bahkan, studi sebelumnya menunjukkan bahwa tailing HPAL yang berbutir halus sulit dikeringkan hingga tingkat kadar air optimal untuk pemadatan yang maksimal. Studi lain mencatat adanya potensi erosi akibat curah hujan tinggi terhadap tumpukan tailing yang difilter,

atau penjenuhan ulang tailing tersebut, yang bisa terdampak apabila terjadi insiden seismik. Secara umum, dorongan untuk menggabungkan teknologi HPAL dan teknologi tailing yang difilter berasal dari desakan untuk meningkatkan produksi nikel dan kobalt dalam rangka transisi global dari kendaraan berbahan bakar fosil ke kendaraan listrik—dan karena teknologi tailing yang difilter dianggap lebih ramah lingkungan dibandingkan alternatif lainnya. Dengan demikian, kombinasi kedua teknologi ini dianggap sebagai "paket hijau" yang lengkap.

Fitur khas dari kapitalisme yang akhir-akhir ini muncul adalah diterapkannya teknologi disruptif, yakni inovasi yang pada awalnya inferior atau menyasar golongan yang kurang terlayani, tetapi kemudian dengan cepat menggantikan teknologi yang ada dengan menawarkan keunggulan lain seperti kenyamanan, keterjangkauan, atau aksesibilitas. Salah satu contohnya adalah kecerdasan buatan generatif, yang menggantikan penulisan orisinal dengan kecepatan dan kemudahan, meskipun kualitas produknya inferior. Slogan "Bergerak cepat dan menghancurkan segala sesuatu (*Move fast and break things*)" telah dikaitkan dengan berbagai teknologi disruptif dan para promotornya, yang mencerminkan makna ganda antara kreativitas dan ketidakpedulian terhadap konsekuensi tindakan. Laporan ini memaparkan bahwa ledakan jumlah teknologi HPAL dan tailing yang difilter di Indonesia merupakan teknologi disruptif sekaligus kegagalan yang berujung bencana atau katastrofik. Untuk mempermudah pemahaman bagi pembaca awam, laporan ini menyertakan tutorial mengenai aspek-aspek penting dari pertambangan dalam konteks Indonesia, termasuk bijih laterit dan pelindian asam tekanan tinggi, alternatif pembuangan tailing, likuifaksi, teknologi tailing yang difilter, metode keseimbangan batas dan faktor keamanan, model deterministik dan statistik untuk analisis kegagalan fasilitas tailing, air asam tambang dan pelindian logam, regulasi tailing di Indonesia, serta dokumen panduan *Safety First*: Pedoman Pengelolaan Tailing Tambang yang Bertanggung Jawab.

Informasi mengenai proyek HPAL dan fasilitas penyimpanan tailing difilter yang ada maupun yang direncanakan mengandung berbagai kontradiksi, bahkan dalam dokumen perusahaan yang sama. Secara umum, kajian tahun 2024 oleh IndoPremier digunakan sebagai acuan utama, meskipun laporan ini mencoba mendokumentasikan setiap nilai yang tersedia dalam literatur untuk parameter seperti kapasitas tahunan proyek HPAL. Berdasarkan itu, kapasitas tahunan tujuh proyek HPAL yang sudah beroperasi adalah 405.000 ton metrik nikel dan 26.500 ton metrik kobalt. Terdapat 14 proyek HPAL yang telah mendapatkan izin dan/atau sedang dibangun, termasuk delapan proyek baru di Kawasan Industri Morowali, dengan kapasitas gabungan tahunan sebesar 850.900 ton metrik nikel dan 38.800 ton metrik kobalt. Perbedaan antara proyek yang diizinkan dan yang masih dalam tahap proposal tidak selalu jelas, tetapi terdapat 12 proyek HPAL tambahan dalam tahap usulan, termasuk tiga proyek lagi di Pulau Obi, dengan kapasitas gabungan tahunan sebesar 745.900 ton metrik nikel. Kapasitas tahunan dari seluruh proyek yang beroperasi dan telah diizinkan adalah 1.255.900 ton metrik nikel dan 65.300 ton metrik kobalt, sedangkan kapasitas tahunan dari seluruh proyek yang beroperasi, telah diizinkan, dan yang diusulkan mencapai 2.001.800 ton metrik nikel dan 65.300 ton metrik kobalt. Dua proyek HPAL di Kawasan Industri Weda Bay dengan kapasitas gabungan 183.000 ton metrik nikel dan 15.000 ton metrik kobalt telah dihentikan atau dibatalkan. Per Agustus 2023, Pulau Obi telah dibagi ke dalam 21 konsesi tambang, yang mencakup 18,5% dari luas daratan pulau tersebut.

Satu-satunya fasilitas penyimpanan tailing difilter yang tersedia informasinya secara rinci adalah fasilitas milik PT HPL di Pulau Obi, meskipun banyak informasi dari perusahaan tersebut bersifat kontradiktif. Berdasarkan produksi tahun 2023 sebesar 50.000 ton metrik nikel, 6.500

ton metrik kobalt, dan 7.496.050 ton metrik tailing, rasio tailing HPAL terhadap logam (nikel atau kobalt) adalah 133—lebih tinggi dari rasio umum sebesar 100 yang selama ini diasumsikan. Berdasarkan hal tersebut, tingkat produksi tailing HPAL tahunan dari semua proyek yang beroperasi, proyek beroperasi ditambah proyek yang telah mendapatkan izin, serta proyek beroperasi ditambah proyek yang diizinkan dan yang diusulkan adalah masing-masing sebesar 57 juta ton metrik, 176 juta ton metrik, dan 275 juta ton metrik per tahun. Fasilitas tailing yang difilter di proyek PT HPL memiliki tinggi maksimum 57 meter, luas tapak 195 hektare, dan kapasitas 25,8 juta meter kubik. Fasilitas tailing tersebut memiliki penyangga (*buttress*) dari batu pecah (*rockfill*), namun tumpukan tailing jauh lebih tinggi dibandingkan penyangga sehingga jika terjadi likuifaksi, tailing dapat dengan mudah meluap melewati puncak penyangga. Kapasitas fasilitas tailing yang difilter di proyek PT HFNC di Kawasan Industri Weda Bay adalah 66 juta ton metrik, setara dengan 33 juta meter kubik, dengan asumsi densitas kering tailing yang difilter sebesar 2,0 ton metrik per meter kubik. Kapasitas yang direncanakan untuk proyek Sonic Bay yang dihentikan di kawasan yang sama adalah 67 juta meter kubik. Luas tapak keseluruhan fasilitas tailing yang difilter di Kawasan Industri Morowali diperkirakan mencapai 600 hektar, namun jumlah pasti fasilitas yang ada belum diketahui. Sejauh ini hanya dua fasilitas bersebelahan milik PT HYNC dan PT QMB yang telah teridentifikasi, dengan luas jauh di bawah 600 hektar. Target kadar air geoteknis tailing HPAL berada di kisaran 30–35%, dengan target 35% untuk proyek PT HPL. Oleh karena itu, istilah "Fasilitas Tailing Kering Bertumpuk" (*Dry Stack Tailings Facility* atau DSTF) untuk fasilitas tailing difilter di proyek PT HPL sebaiknya dipahami lebih sebagai istilah pemasaran atau hubungan masyarakat.

Karena curah hujan tinggi cenderung menyebabkan re-saturasi pada tailing yang difilter, maka derasnya curah hujan menjadi kendala utama terhadap tinggi, volume penyimpanan, dan laju produksi (*throughput*) fasilitas penyimpanan tailing yang difilter. Batas teknologi saat ini untuk fasilitas tailing yang difilter ditentukan berdasarkan data dari 84 fasilitas dengan informasi tinggi dan volume penyimpanan yang diketahui, serta 23 fasilitas dengan informasi *throughput* yang tersedia. Batas volume penyimpanan saat ini ditentukan dari garis yang menghubungkan fasilitas tailing yang difilter di tambang La Coipa, Chili (dengan kapasitas 71 juta meter kubik dan rerata curah hujan tahunan 43 mm), dan fasilitas tailing yang difilter di tambang COMILOG, Gabon (8,6 juta meter kubik dan rerata curah hujan tahunan 1.779 mm). Sementara itu, batas teknologi untuk tinggi fasilitas ditentukan oleh garis yang menghubungkan fasilitas La Coipa (tinggi 200 meter) dan COMILOG (tinggi 30 meter). Terakhir, batas teknologi untuk *throughput* ditentukan berdasarkan garis antara tumpukan tailing yang difilter Karara di Australia (50.000 ton tailing per hari dengan rerata curah hujan 310 mm) dan tumpukan tailing difilter Escobal di Guatemala (1.528 ton tailing per hari dengan rerata curah hujan 1.689 mm). Berdasarkan rerata curah hujan tahunan 2.252 mm, 2.241 mm, dan 1.754 mm serta *throughput* masing-masing sebesar 28.356 ton/hari, 49.041 ton/hari, dan 20.537 ton/hari untuk proyek Sonic Bay, PT HFNC, dan PT HPL, ketiga proyek tersebut jelas melampaui batas teknologi saat ini dari segi volume penyimpanan, tinggi, dan *throughput* pada tingkat curah hujan yang ada.

Laporan konsultasi tahun 2022 oleh SRK Consulting untuk proyek PT HPL di Pulau Obi mencatat adanya kontaminasi air tanah oleh boron, kromium-6, dan nikel. Menurut SRK Consulting, meskipun fasilitas tersebut telah beroperasi selama 1,5 tahun, sebagian infrastruktur drainasenya belum dibangun. Selain itu, belum jelas bagaimana desain infrastruktur drainase yang dirancang dapat mengalirkan kelebihan air dari fasilitas tailing yang difilter. Satu-satunya langkah mitigasi yang diusulkan oleh SRK Consulting adalah menyelidiki potensi pelindian

logam dari air dalam tumpukan tailing yang difilter—yang tentu saja bukanlah tindakan pencegahan terhadap pencemaran air tanah mengingat air tersebut telah tercemar logam beracun. Dalam versi awal laporan, SRK sempat merekomendasikan penyelidikan terhadap potensi penghasil asam dari tailing yang difilter tersebut, namun rekomendasi itu kemudian dihapus, meskipun versi final laporannya tetap menyatakan bahwa potensi penghasil asam dari tailing tersebut belum diketahui.

Dapat diartikan, kontaminasi air tanah dimungkinkan terjadi pada rancangan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di proyek PT HPL. Tidak ada laporan konsultasi yang menyebutkan keberadaan lapisan pelindung (liner) di dasar fasilitas, padahal ini adalah cara yang secara umum diterapkan untuk mencegah rembesan agar tidak mencemari air tanah. Laporan konsultasi tahun 2020 oleh PT Lapi ITB menghitung bahwa sebanyak 29.326 meter kubik air yang berpotensi terkontaminasi akan meresap ke akuifer di bawahnya setiap tahun dan mensimulasikan penyebaran kontaminan melalui sistem air tanah setelah 10, 50, dan 100 tahun. Laporan dari PT Lapi ITB juga memprediksi kenaikan muka air dalam tumpukan tailing yang difilter akibat lambatnya laju aliran rembesan keluar menuju sistem air tanah.

Laporan PT Lapi ITB dan laporan konsultasi lainnya pada tahun 2020 oleh Hatch menggunakan metodologi yang berbeda untuk menunjukkan bahwa tailing yang difilter akan cukup rentan terhadap likuifaksi. Laporan dari Hatch juga menyampaikan kekhawatiran terhadap kemungkinan ketidakstabilan dan likuifaksi akibat kenaikan muka air di dalam tumpukan tailing yang difilter seperti yang diprediksi oleh PT Lapi ITB, terutama jika terjadi aktivitas seismik. Menurut Hatch, tumpukan tailing yang difilter akan menjadi tidak stabil jika muka air naik hingga kurang dari 30 meter dari puncak tumpukan. Laporan PT Lapi ITB juga memprediksi bahwa fondasi tumpukan tailing yang difilter akan tidak stabil terhadap aktivitas seismik, dan penyangga dari batu pecah akan tidak stabil jika dibangun lebih tinggi dari 15 meter. Meskipun tidak disebutkan secara eksplisit, potensi ketidakstabilan penyangga yang tinggi bisa jadi menjadi alasan mengapa rancangan fasilitas ini mensyaratkan agar tailing ditumpuk jauh lebih tinggi dari puncak penyangga. Akhirnya, PT Lapi ITB juga memprediksi bahwa beberapa bagian dari fasilitas penyimpanan tailing yang difilter ini akan tidak stabil apabila terjadi aktivitas seismik sementara penumpukan tailing terus dilakukan sesuai yang direncanakan.

Laporan tahun 2022 oleh SRK Consulting memuat semua informasi yang diperlukan untuk menyimpulkan bahwa, per Desember 2022, fasilitas penyimpanan tailing yang difilter tersebut berada dalam kondisi rawan gagal secara katastrofik. Menurut SRK Consulting, fasilitas tailing telah dibangun tanpa pengendalian mutu terhadap kadar air geoteknis maupun kepadatan tailing. Meskipun target kadar air geoteknis tailing yang tersaring oleh filter press adalah 35%, kadar air aktual bervariasi dari 8 hingga 36% dengan rerata 24,5%. Meskipun densitas kering hasil pemadatan dalam desain adalah 2,22 ton per meter kubik, tailing ternyata terlalu kering untuk dipadatkan dengan baik, sehingga densitas hasil pemadatan aktual berkisar dari 0,93 ton per meter kubik (lebih ringan dari air) hingga 2,20 ton per meter kubik, dengan rerata antara 1,287 hingga 1,355 ton per meter kubik. Laporan tahun 2020 oleh Hatch mengukur densitas kering hasil pemadatan maksimum sebesar 1,6 ton per meter kubik, yang dibantah oleh laporan PT Lapi ITB tahun 2020 sebagai tidak kredibel dan mengusulkan nilai alternatif sebesar 1,76 ton per meter kubik—hal ini menunjukkan adanya ketidaksinkronan dalam cara pengukuran densitas kering yang benar. Karena densitas tailing lebih rendah dari yang diperkirakan, SRK Consulting memperkirakan bahwa fasilitas tailing yang difilter akan mencapai kapasitas penuh hanya dalam kurun waktu 4,5 tahun, yaitu sekitar pertengahan tahun 2027. Meskipun tanggal penutupan sudah

mendekat, SRK Consulting melaporkan bahwa rencana penutupan baru berada pada tahap konseptual. SRK Consulting juga mencatat tidak adanya data pemantauan, termasuk tidak adanya pemantauan air tanah, pengukuran rembesan di kaki lereng (*toe seepage*), survei berkala, inclinometer, pengujian CPT (*Cone Penetration Test*), pemantauan kualitas air, pemantauan meteorologis, piezometer, bendungan V-notch, maupun inspeksi rutin.

SRK Consulting menggambarkan risiko kegagalan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter sebagai "risiko yang tidak terkendali." Penting untuk dicatat bahwa kurangnya pengendalian mutu dalam konstruksi lapisan bawah fasilitas ini bukanlah masalah yang bisa diperbaiki. Sepanjang tahun 2023 dan 2024, PT HPL terus menambahkan tailing di atas lapisan tailing yang telah dipadatkan secara tidak memadai pada tahun 2021 dan 2022. Bahkan jika pengendalian mutu dilakukan secara sempurna sejak tahun 2023, penambahan tailing baru justru meningkatkan kemungkinan bahwa lapisan bawah tumpukan tailing akan mengalami pemadatan mendadak, yang dapat menyebabkan likuifaksi dan kegagalan katastrofik terhadap fasilitas secara keseluruhan.

Laporan SRK Consulting, serta laporan dari PT Lapi ITB, menyampaikan analisis terhadap dampak yang mungkin terjadi jika fasilitas penyimpanan tailing yang difilter gagal secara katastrofik (diistilahkan analisis *dam break*). Menurut kedua laporan tersebut, sebuah model deterministik memprediksi bahwa tailing akan mengalir sejauh 2.200 meter meskipun tailing sepenuhnya mengalami likuifaksi. Model deterministik bergantung pada banyak parameter yang seringkali tidak diketahui secara pasti, sehingga rentan terhadap manipulasi, baik yang disengaja maupun tidak. Khususnya, model tersebut seharusnya bergantung pada kekuatan residual (atau kekuatan pasca-likuifaksi) tailing, yang menurut SRK Consulting tidak pernah diukur. Sebaliknya, berdasarkan ketinggian dan volume penyimpanan fasilitas di proyek PT HPL, sebuah model statistik yang dikembangkan dari kegagalan fasilitas penyimpanan tailing sebelumnya memprediksi bahwa tailing akan mengalir sejauh 47 kilometer dalam skenario paling mungkin (pelepasan 33% tailing yang tersimpan) dan 161 kilometer dalam skenario terburuk (pelepasan 100% tailing yang tersimpan), sehingga dapat dipastikan tailing akan mencapai laut dalam kondisi apapun. Model deterministik menunjukkan area banjir dengan genangan air tidak beraturan yang berhenti kurang dari satu kilometer dari Laut Maluku, yang biasanya menunjukkan model topografi yang salah (hambatan aliran yang tidak nyata). Namun, area banjir yang diprediksi justru memotong sebuah sungai yang mengalir ke barat sekitar 570 meter dari kaki fasilitas penyimpanan tailing, sesuai arah aliran tailing. Maka, prediksi yang lebih mungkin adalah bahwa tailing akan mencapai sungai dan kemudian mengalir ke barat sejauh 1.600 meter menuju Laut Maluku dengan dampak besar terhadap infrastruktur pertambangan dan para pekerja tambang proyek PT HPL, serta desa Kawasi di muara sungai ke laut. Berdasarkan kegagalan dua tumpukan tailing yang difilter di Brasil baru-baru ini, tailing akan mengalir sejauh 20 kali tinggi tumpukan (1.140 meter dalam kasus tumpukan PT HPL) hanya melalui longsoran padat, bahkan tanpa adanya likuifaksi. Maka, setelah tailing mencapai sungai, massa tailing yang sepenuhnya terlikuidasi akan berkembang meskipun tidak terjadi likuifaksi awal pada tailing yang difilter.

Terlepas dari peringatan keras yang dimuat dalam laporan SRK Consulting, urutan revisi menunjukkan bahwa peringatan tersebut justru dianggap tidak terlalu serius dan beberapa informasi penting justru dihapus. Laporan tersebut mengalami sembilan revisi besar, serta berbagai revisi kecil (seperti Revisi 7A, 7B, 7C, 7D, dan 7E). Revisi 1 menyertakan foto besar dengan judul "Pemandangan area DSTF [Fasilitas Tailing Tumpuk Kering] **dengan genangan**

air yang signifikan" (penekanan ditambahkan). Revisi 1 juga menyatakan, "**Selama kunjungan lapangan, terdapat sejumlah persoalan terkait genangan air dan sistem drainase yang buruk** … Desain mempertimbangkan bahwa pemadatan tailing akan cukup untuk mencegah likuifaksi; namun, menurut pandangan SRK, mengingat tinggi fasilitas (57 m), tidak adanya pengendalian mutu dalam penempatan tailing, **dan persoalan genangan air di permukaan**, maka akan diperlukan kajian lebih lanjut untuk menilai seberapa besar risiko tailing menunjukkan perilaku kontraktif saat mengalami geseran tanpa drainase" (penekanan ditambahkan).

Genangan air di permukaan merupakan persoalan serius bagi fasilitas penyimpanan tailing yang difilter karena air yang tergenang dapat menyebabkan erosi dan penggerusan (pembentukan parit) pada tumpukan tailing serta membuat area tersebut tidak dapat dilalui kendaraan. Genangan air di permukaan biasanya terjadi akibat kombinasi dari penyaringan tailing yang tidak memadai, penumpukan tailing saat curah hujan tinggi, infrastruktur drainase internal yang kurang memadai, dan kemiringan permukaan yang tidak cukup untuk mendorong aliran air. Selain itu, genangan air meningkatkan kemungkinan seluruh tumpukan menjadi jenuh dan rentan terhadap likuifaksi, sementara air permukaan dapat memicu perilaku aliran jika terjadi runtuhan. Faktanya, menurut laporan tahun 2020 dari PT Lapi ITB, jika tumpukan tailing yang difilter jenuh hingga 80% dari ketinggiannya, maka fasilitas tersebut harus dikategorikan dalam Tingkat Darurat 3, yaitu "kegagalan yang segera atau sedang berlangsung yang membutuhkan evakuasi sebagian atau seluruhnya, komunikasi darurat, dan tindakan respons." Tingkat kejenuhan pada tumpukan tailing yang difilter seharusnya dapat ditentukan dari data piezometer, namun seperti dicatat oleh SRK Consulting, data tersebut tidak tersedia. Cara sederhana untuk menilai apakah tumpukan tersebut sepenuhnya jenuh adalah dengan mengamati seberapa lama genangan air bertahan setelah hujan berhenti. Laporan dari SRK Consulting tidak menjawab pertanyaan mengenai berapa lama genangan air bertahan setelah hujan.

Dalam revisi kecil pertama setelah Revisi 1, foto tersebut diperkecil secara signifikan dan keterangan fotonya diubah menjadi "Pemandangan area DSTF **dengan persoalan genangan air**" (penekanan ditambahkan). Kutipan penting masih dipertahankan: "**Selama kunjungan lapangan, terdapat sejumlah persoalan terkait genangan air dan sistem drainase yang buruk** … Desain mempertimbangkan bahwa pemadatan tailing akan cukup untuk mencegah likuifaksi; namun, menurut pandangan SRK, mengingat tinggi fasilitas (57 m), tidak adanya pengendalian mutu dalam penempatan tailing, **dan persoalan genangan air di permukaan**, maka akan diperlukan kajian lebih lanjut untuk menilai seberapa besar risiko tailing menunjukkan perilaku kontraktif saat mengalami geseran tanpa drainase." Hingga Revisi 8, foto, keterangan, dan kutipan kunci tetap dipertahankan, kecuali bahwa "DSTF" diubah menjadi "fasilitas tailing tumpuk kering" pada keterangan foto dan "sistem drainase yang buruk" diubah menjadi "sistem drainase" dalam tanda kutip. Perubahan signifikan terjadi pada Revisi 8A ketika keterangan foto menjadi hanya "Pemandangan area fasilitas tailing tumpuk kering." Dalam kutipan kunci, kalimat "Selama kunjungan lapangan, terdapat sejumlah persoalan terkait genangan air dan sistem drainase" dan frasa "dan persoalan genangan air di permukaan" dihapus, yang membuat kalimat terakhir menjadi tidak gramatikal. Satu-satunya perubahan hingga Revisi 9 adalah koreksi tata bahasa agar kutipan berbunyi: "Desain mempertimbangkan bahwa pemadatan tailing akan cukup untuk mencegah likuifaksi; namun, menurut pandangan SRK, mengingat tinggi fasilitas (57 m) dan tidak adanya pengendalian mutu dalam penempatan tailing, maka akan diperlukan kajian lebih lanjut untuk menilai seberapa besar risiko tailing

menunjukkan perilaku kontraktif saat mengalami geseran tanpa drainase." Maka, informasi penting mengenai genangan air di permukaan sepenuhnya hilang dari versi akhir laporan SRK Consulting, kecuali adanya satu foto kecil dengan keterangan yang tidak relevan.

Contoh lain dari potensi kegagalan katastrofik yang segera terjadi di Pulau Obi adalah sebuah laporan internal perusahaan PT HPL pada Januari 2023 yang mengungkap keberadaan empat fasilitas penyimpanan tailing terfilter berukuran lebih kecil. Menurut laporan tersebut, salah satu fasilitas, yang disebut "Karo Disposal Tailings Dump", memiliki faktor keamanan hanya 1,045, yang menunjukkan bahwa fasilitas tersebut berada di ambang kegagalan katastrofik. Rekomendasi dalam laporan tersebut adalah agar pembuangan tailing di "Karo Disposal Tailings Dump" dihentikan. Namun, laporan tersebut tidak memberikan rekomendasi apa pun terkait keselamatan pekerja tambang, meskipun fasilitas yang tidak stabil tersebut hanya berjarak beberapa ratus meter dari infrastruktur pertambangan yang cukup luas.

Meskipun kegagalan katastrofik fasilitas penyimpanan tailing yang difilter sudah sangat dekat di Pulau Obi, kenyataannya kegagalan tersebut sedang berlangsung di Indonesia Morowali Industrial Park di Pulau Sulawesi. Pada 16 Maret 2025, fasilitas penyimpanan tailing terfilter PT HYNC mengalami kegagalan akibat likuifaksi dan tailing yang keluar mengalir ke Sungai Bahodopi dan meluap ke berbagai kawasan industri dalam perjalanannya menuju Laut Banda. Pada 21 Maret 2025, terjadi longsor di fasilitas penyimpanan tailing terfilter milik PT QMB yang bersebelahan, mengakibatkan tiga pekerja tambang tewas. Penggalian jenazah pekerja yang tertimbun mengungkap adanya kolam yang telah ditimbun untuk membangun fasilitas penyimpanan tailing yang difilter tersebut. Pembangunan di atas kolam yang ditimbun merupakan praktik yang dipertanyakan karena dapat menyebabkan tingginya muka air tanah di dalam fasilitas penyimpanan tailing. Kemungkinan besar, saat penggali menggali di bawah muka air tanah, kolam tersebut muncul kembali di lokasi semula. Salah satu korban ditemukan di dasar kolam tersebut, sementara dua korban lainnya tidak ditemukan. Maka, dapat dikatakan bahwa fasilitas penyimpanan tailing terfilter tersebut runtuh di titik terlemahnya, yaitu tempat di mana muka air tanah paling tinggi. Tanggapan dari PT QMB menyatakan bahwa curah hujan yang memicu longsor tersebut merupakan kejadian dengan periode ulang 50 tahun dan oleh karena itu, "di luar kendali manusia." Namun, fasilitas penyimpanan tailing yang jika gagal dapat menyebabkan hilangnya nyawa manusia seharusnya dirancang untuk tahan terhadap kejadian curah hujan dengan periode ulang 10.000 tahun atau terhadap Banjir Maksimum Probabilistik (PMF/*Probable Maximum Flood*).

Pada 27 Maret 2025, tumpukan bijih di proyek PT QMB runtuh, mengubur alat berat, meskipun tidak ada korban jiwa. Lokasi tumpukan bijih ini tidak diketahui dan tumpukan bijih bukanlah fasilitas tailing, namun kejadian ini menimbulkan pertanyaan mengenai kualitas konstruksi infrastruktur pertambangan di proyek PT QMB. Longsor terbaru di fasilitas penyimpanan tailing terfilter PT QMB terjadi pada 30 April 2025 tanpa laporan korban jiwa. Terdapat bukti bahwa bahkan lebih banyak kegagalan telah terjadi di fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Indonesia Morowali Industrial Park. Citra satelit dari 3 Januari 2025 menunjukkan longsoran yang jelas dari fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di PT HYNC, lengkap dengan alur saluran tailing yang mengarah ke Sungai Bahodopi. Akhirnya, sebuah video yang diambil oleh seorang pekerja tambang menunjukkan buldoser yang tertimbun longsoran di salah satu fasilitas penyimpanan tailing terfilter yang tidak teridentifikasi di Indonesia Morowali Industrial Park pada September 2023.

Berbagai skenario ke depan dipenuhi dengan bahaya. Kesimpulan yang mudah dan sederhana adalah bahwa kombinasi teknologi HPAL dan tailing yang difilter tidak berhasil, terutama mengingat curah hujan tinggi dan aktivitas seismik di Indonesia. Skenario berbahaya pertama adalah perusahaan tambang akan beralih dari tailing yang difilter ke fasilitas penyimpanan tailing konvensional. Faktanya, per Desember 2022, PT HPL telah mengajukan izin untuk membangun tiga bendungan tailing konvensional di Pulau Obi yang akan digunakan setelah "*Dry Stack Tailings Facility*" (DSTF) mencapai kapasitas penuh (yang diperkirakan terjadi pada pertengahan 2027). Dengan total luas lahan gabungan 1.556 hektar, ketiga fasilitas penyimpanan tailing konvensional tersebut akan mencakup area delapan kali lebih luas dibandingkan dengan DSTF yang ada saat ini. Keberadaan dua dari fasilitas tailing konvensional tersebut di hulu Sungai Akelamo menunjukkan bahwa jika terjadi kegagalan bendungan tailing, seluruh Daerah Aliran Sungai (DAS) Akelamo dapat terkontaminasi. Skenario berbahaya kedua adalah bahwa perusahaan tambang akan bersikeras menuntut hak untuk membuang tailing HPAL langsung ke laut.

Skenario berbahaya ketiga adalah bahwa fasilitas penyimpanan tailing yang difilter akan dibangun dengan luas lahan sangat besar dan ketinggian rendah untuk meminimalkan kemungkinan kegagalan yang katastrofik. Menurut para pekerja di PT Obi Nickel Cobalt (ONC), rencananya adalah menyimpan 132 juta ton metrik tailing yang difilter di atas lahan seluas 2.344 hektar. Dengan asumsi kerapatan kering padat sebesar 2,0 ton metrik per meter kubik, maka volume fasilitas penyimpanan tailing tersebut adalah 66 juta meter kubik. Jika fasilitas ini dimodelkan sebagai prisma persegi panjang di atas permukaan datar, maka ketinggiannya hanya 2,8 meter. Dengan demikian, keruntuhan dapat dihindari dengan memaksimalkan perusakan hutan, atau dengan kata lain, membangun fasilitas tailing dalam kondisi telah runtuh sebelumnya. Tidak ada informasi lain yang tersedia mengenai rencana penyimpanan tailing di PT ONC.

Meskipun banyak bahaya yang menghadang, masih ada jalur alternatif. Kesimpulan yang mudah bahwa kombinasi teknologi HPAL dan tailing yang difilter tidak berhasil di Indonesia sesungguhnya adalah pandangan yang terlalu dangkal, karena tidak jelas apakah memang pernah ada upaya sungguh-sungguh untuk menerapkan teknologi disruptif ini dengan baik. Secara khusus, ketiadaan pengendalian mutu atau pemantauan sama sekali tidak akan berhasil, bahkan untuk tumpukan tailing yang pendek di iklim paling kering sekalipun. Rekomendasi umum dari laporan ini adalah bahwa kombinasi teknologi HPAL dan tailing yang difilter tetap dilanjutkan, tetapi perhatian serius perlu diberikan pada prinsip-prinsip keselamatan.

Laporan ini memberikan rekomendasi khusus kepada pemerintah Indonesia untuk dilaksanakan secara berurutan sebagai berikut:

1) Tindakan segera harus diambil untuk melindungi keselamatan para pekerja tambang dan masyarakat yang tinggal di daerah hilir dari fasilitas penyimpanan tailing kering (*Dry Stack Tailings Facility*/DSTF) proyek PT HPL di Pulau Obi.
2) Kegiatan pembuangan tailing harus dihentikan di seluruh fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Indonesia.
3) Harus diberlakukan moratorium terhadap izin pembangunan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter yang baru di Indonesia.
4) Izin yang telah diberikan untuk fasilitas penyimpanan tailing yang difilter yang belum dibangun harus dicabut.

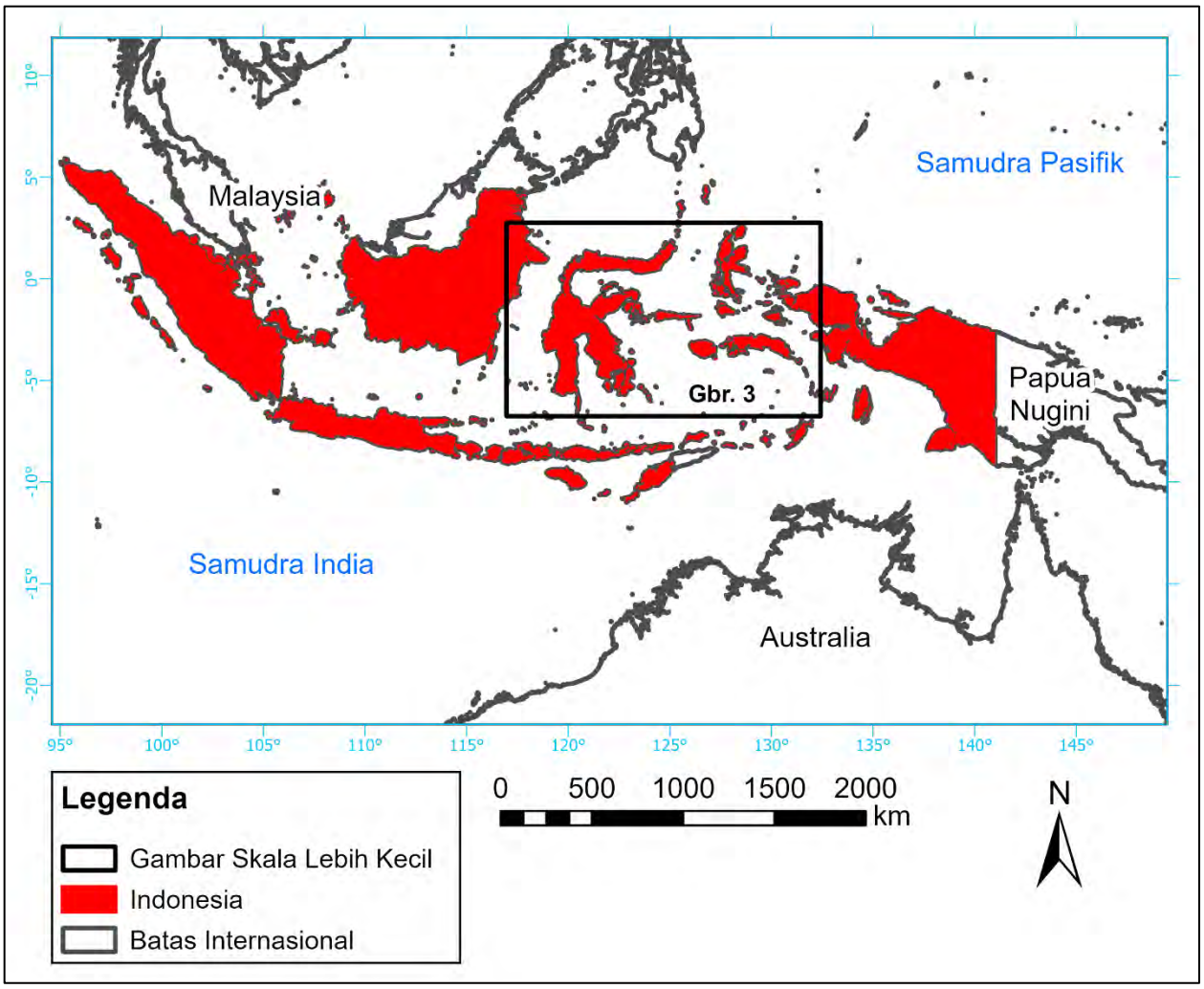
5) Audit keselamatan harus dilakukan terhadap seluruh fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Indonesia oleh perusahaan konsultan independen yang ditunjuk oleh pemerintah Indonesia, tetapi biaya audit ditanggung oleh pemilik fasilitas penyimpanan tailing tersebut.
6) Indonesia harus menyusun pedoman untuk pembangunan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter yang aman sesuai dengan konteks Indonesia. Titik awal yang berguna mencakup pedoman yang dikembangkan oleh Konsorsium Manajemen Tailing BHP Rio Tinto untuk industri pertambangan, pedoman yang dikembangkan oleh AECOM untuk Kantor Kejaksaan Umum Minas Gerais (Brasil), serta bagian relevan dari FEMA ((U.S.) Federal Emergency Management Agency) *Tailings Dam Best Safety Practices*. Perhatian khusus perlu diberikan pada berbagai kekurangan di masa lalu dalam pembangunan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Indonesia, seperti perlunya pemantauan, perlunya rencana penutupan sebelum izin dikeluarkan, dan perlunya pengendalian mutu terhadap kadar air geoteknik dan kerapatan padat tailing.
7) Fasilitas penyimpanan tailing yang difilter yang telah ada dan memperoleh hasil audit keselamatan yang memuaskan dapat dibuka kembali dengan komitmen untuk mematuhi pedoman tailing yang difilter versi Indonesia.
8) Fasilitas penyimpanan tailing yang difilter yang telah diizinkan sebelumnya dapat dibangun dengan komitmen untuk mematuhi pedoman tersebut.
9) Izin baru dapat diberikan untuk pembangunan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter dengan komitmen untuk mematuhi pedoman tersebut.
10) Indonesia harus mengesahkan undang-undang yang melarang pembuangan tailing ke laut dalam.
11) Indonesia harus secara penuh mengadopsi dokumen panduan *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management*.

IKHTISAR

Dari tahun 2015 hingga 2024, produksi tahunan nikel dari kegiatan pertambangan di Indonesia meningkat dari 130.000 menjadi 2.200.000 ton metrik, naik dari 5,7% menjadi 59,5% dari total produksi tambang nikel dunia (USGS, 2025a; lihat Gambar 1 dan 2a). Dengan pola yang serupa, produksi tahunan kobalt dari kegiatan pertambangan di Indonesia meningkat dari 1.100 menjadi 28.000 ton metrik dalam kurun waktu 2020 hingga 2024, naik dari 1,1% menjadi 9,7% dari total produksi tambang kobalt dunia (USGS, 2025b; lihat Gambar 2b). Kenaikan drastis ini sebagian dicapai melalui pembukaan lima proyek pelindihan asam bertekanan tinggi (*high-pressure acid leaching*-HPAL) dari bulan Juni 2021 (PT Halmahera Persada Lygend, 2022) hingga April 2024 (PT Obi Nickel Cobalt, 2025), untuk mengekstraksi presipitat hidroksida campuran nikel dan kobalt dari bijih laterit (tanah pelapukan dalam yang terkonsolidasi dan terkementasi). Kelima proyek HPAL tersebut meliputi PT Halmahera Persada Lygend (HPL) dan PT Obi Nickel Cobalt (ONC) di Pulau Obi, Provinsi Maluku Utara; PT Qing Mei Bang (QMB) New Energy Materials dan PT Huayue Nickel Cobalt (HYNC) di Kawasan Industri Morowali Indonesia di Pulau Sulawesi, Provinsi Sulawesi Tengah; serta PT Huafei Nickel Cobalt (HFNC) di Kawasan Industri Weda Bay di Pulau Halmahera, Provinsi Maluku Utara (lihat Gambar 3 dan Tabel 1a-d). Proyek HPAL keenam dan ketujuh, yaitu PT ESG New Energy Material dan PT Meiming New Energy Material, yang juga berlokasi di Kawasan Industri Morowali Indonesia di Pulau Sulawesi, mulai berproduksi masing-masing pada Januari

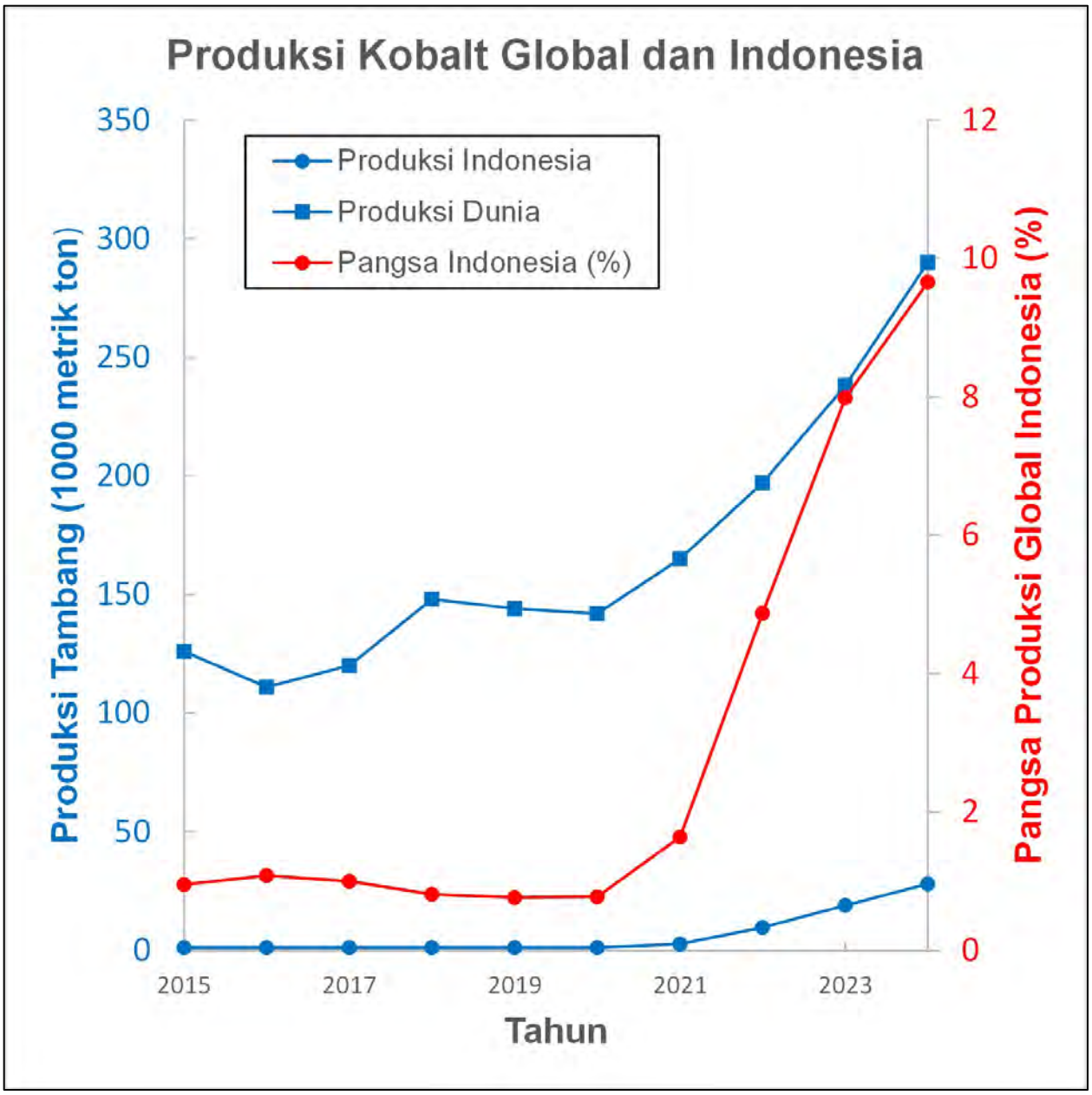
2025 dan kuartal pertama tahun 2025 (Merdeka Battery Materials, 2024). Proyek PT Halmahera Persada Lygend (HPL), sebagai proyek HPAL pertama di Indonesia yang mulai beroperasi pada Juni 2021, juga melakukan langkah tambahan berupa konversi presipitat hidroksida campuran menjadi nikel sulfat dan kobalt sulfat (PT Halmahera Persada Lygend, 2024).

Penggunaan teknologi HPAL untuk mengolah bijih laterit bukanlah hal baru, bahkan di wilayah beriklim tropis dengan curah hujan tinggi. Sebelum proyek pertama di Indonesia, terdapat total 11 proyek HPAL yang telah dibuka, termasuk proyek Coral Bay (2005) dan proyek Taganito (2013) di Filipina, proyek Goro (2009) di Kaledonia Baru, serta proyek Ramu (2012) di Papua Nugini (lihat Tabel 2). Salah satu ciri khas dari masuknya teknologi HPAL ke Indonesia adalah kecepatan dalam pelaksanaan proyek-proyek baru. Sementara proyek HPAL pertama dibuka di Kuba pada tahun 1959, secara global hanya 10 proyek HPAL baru yang beroperasi selama 18 tahun antara 1998 hingga 2015 (lihat Tabel 2). Sebaliknya, tujuh proyek HPAL mulai beroperasi di Indonesia hanya dalam kurun waktu 46 bulan dari Juni 2021 hingga Maret 2025, atau rata-rata satu proyek HPAL baru dalam setiap enam setengah bulan (lihat Tabel 1a). Selain itu, terdapat 14 proyek HPAL yang telah memperoleh izin dan/atau sedang dalam tahap konstruksi, termasuk delapan proyek baru di Kawasan Industri Morowali Indonesia (lihat Tabel 1b). Meskipun perbedaan antara proyek yang telah mendapat izin dan proyek yang masih berupa usulan tidak selalu jelas, terdapat 12 proyek HPAL tambahan yang masih berada dalam tahap usulan, termasuk tiga di antaranya di Pulau Obi (lihat Tabel 1c). Sementara itu, dua proyek HPAL di Kawasan Industri Weda Bay telah dihentikan atau dibatalkan (lihat Tabel 1d). Ciri khas lain dari pengembangan teknologi HPAL di Indonesia adalah kecepatan pencapaian kapasitas terpasang (*nameplate capacity*) oleh pabrik-pabrik HPAL. Proyek HPAL pertama di Indonesia, PT HPL, mencapai kapasitas terpasang sebesar 50.000 ton metrik nikel dan 6.500 ton metrik kobalt per tahun hanya dalam waktu 12 bulan, dan menjadi pabrik HPAL kedua di dunia yang berhasil mencapai kapasitas tersebut (PT Halmahera Persada Lygend, 2023a), setelah proyek HPAL Taganito di Filipina (Shibayama, 2016). Sebagai contoh lain, PT Huayue Nickel Cobalt (HYNC) mulai berproduksi pada Januari 2022 dan telah mencapai kapasitas terpasangnya pada saat artikel oleh Fisher dan Grossl (2023) diterbitkan pada Juli 2023, sehingga pencapaian kapasitas terpasang dalam waktu 12–18 bulan kini tampaknya menjadi praktik standar bagi proyek HPAL di Indonesia.

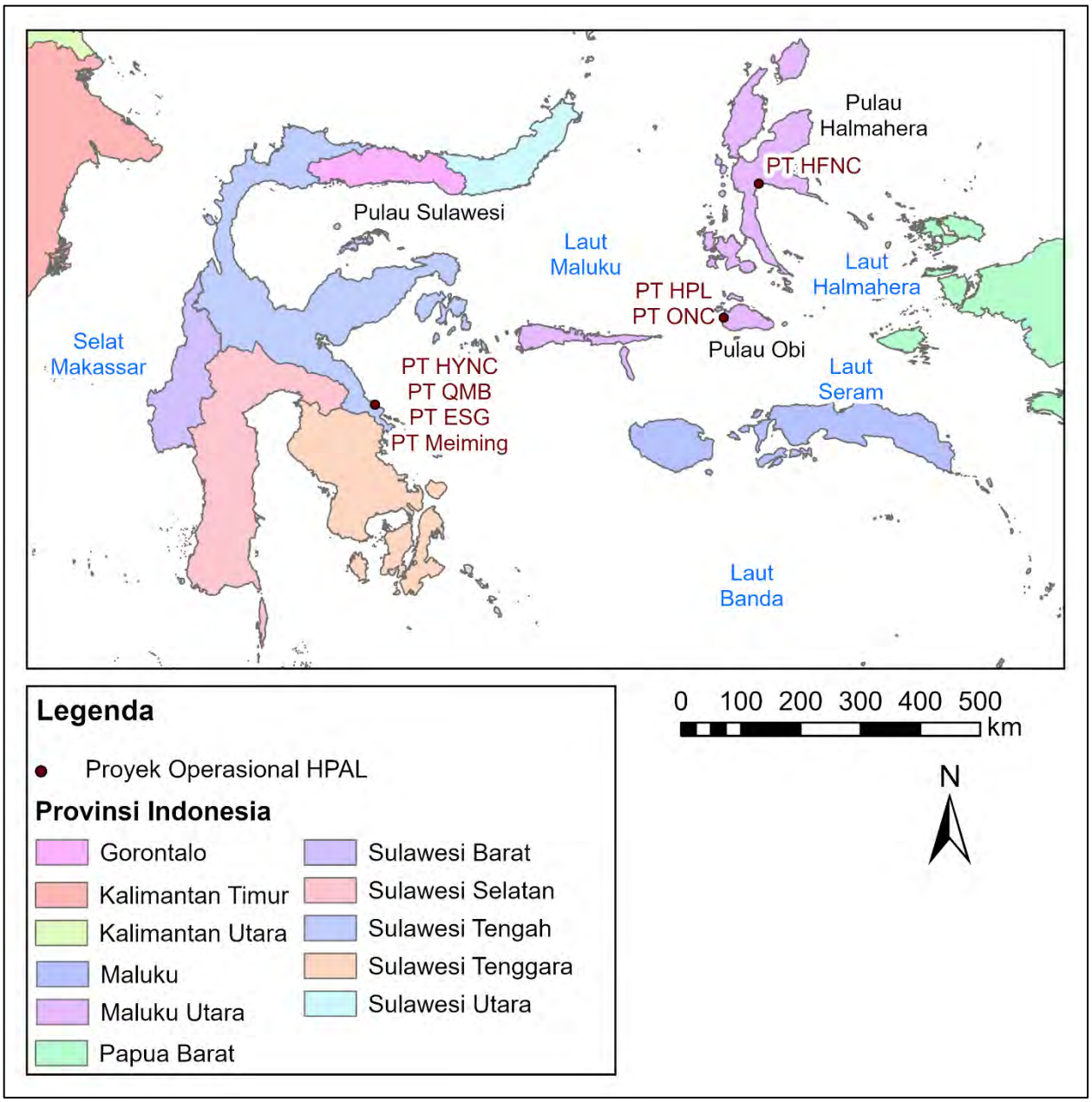


Gambar 1. Tujuan dari laporan ini adalah untuk mengevaluasi kinerja fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Indonesia. Sejauh ini, semua proyek tailing yang difilter telah dibangun di Pulau Halmahera, Pulau Obi, atau Pulau Sulawesi (lihat Gambar 3).

Gambar 2a. Dari tahun 2015 hingga 2024, produksi tahunan nikel dari kegiatan pertambangan di Indonesia meningkat dari 130.000 menjadi 2.200.000 ton metrik, naik dari 5,7% menjadi 59,5% dari total produksi tambang nikel dunia. Data dari USGS (2025a).



Gambar 2b. Dari tahun 2020 hingga 2024, produksi tahunan kobalt dari kegiatan pertambangan di Indonesia meningkat dari 1.100 menjadi 28.000 ton metrik, naik dari 1,1% menjadi 9,7% dari total produksi tambang kobalt dunia. Data dari USGS (2025b).



Gambar 3. Tujuh proyek HPAL yang telah beroperasi di Indonesia adalah PT Halmahera Persada Lygend (HPL) dan PT Obi Nickel Cobalt (ONC) di Pulau Obi, Provinsi Maluku Utara; PT Huayue Nickel Cobalt (HYNC), PT Qing Mei Bang (QMB) New Energy Materials, PT ESG New Energy Material, dan PT Meiming New Energy Material di Indonesia Morowali Industrial Park, Pulau Sulawesi, Provinsi Sulawesi Tengah; serta PT Huafei Nickel Cobalt (HFNC) di Weda Bay Industrial Park, Pulau Halmahera, Provinsi Maluku Utara (lihat Tabel 1a). Lokasi PT HYNC, PT QMB, PT ESG, dan PT Meiming, serta lokasi PT HPL dan PT ONC tidak dapat dibedakan pada skala peta ini. Lihat peta skala lebih besar pada Gambar 1.

Tabel 1a. Proyek HPAL di Indonesia: Telah Beroperasi[1]

Nama	Lokasi	Kepemilikan	Kapasitas Tahunan (ton metrik)	Tahun Operasional
PT Halmahera Persada Lygend (HPL)[2]	Pulau Obi, Maluku Utara	Trimegah Bangun Persada (45,1%), Ningbo Lygend Mining (54,9%)	55,000 Ni[3,4] 50,000 Ni[5] 6500 Co[5]	2021[6]
PT Huayue Nickel Cobalt (HYNC)	Indonesia Morowali Industrial Park, Sulawesi Tengah	Zhejiang Huayou Cobalt (57%)[6], China Molybdenum (30%)[6], Nickel Industries (10%), Lainnya (3%)	60,000 Ni[7,8] 5000 Co[9] 70,000 Ni+Co[10]	2021[11,12]
PT Qing Mei Bang (QMB) New Energy Materials	Indonesia Morowali Industrial Park, Sulawesi Tengah	Jingmen GEM New Material (36%), Brunp (35%), New Horizon International Holding (21%), Tsingshan Holding Group (10%) Hanwa (8%)[6,13]	50,000 Ni[14,15] 50,000 Ni+Co[16]	2022[6]
PT Huafei Nickel Cobalt (HFNC)	Weda Bay Industrial Park, Pulau Halmahera, Maluku Utara	Zhejiang Huayou Cobalt (51%), EVE Battery (17%), Glaucous International (30%), Lindo Investment (2%)[17]	120,000 Ni 15,000 Co[18]	2023[18]
PT Obi Nickel Cobalt (ONC)	Pulau Obi, Maluku Utara	Trimegah Bangun Persada (10%), Lygend (60%), Harita Group (30%)	65,000 Ni	2024
PT ESG New Energy Material	Indonesia Morowali Industrial Park, Sulawesi Tengah	MBMA (55%), GEM (45%; opsi untuk Ecopro (21%))	30,000 Ni[19]	2025
PT Meiming New Energy Material[20]	Indonesia Morowali Industrial Park, Sulawesi Tengah	MBMA, GEM[21]	25,000 Ni[21]	2025[22]

[1]Data dari IndoPremier (2024) dan produk yang dimaksud adalah presipitat hidroksida campuran kecuali dinyatakan lain.
[2]Produk berupa presipitat hidroksida campuran serta nikel sulfat dan tembaga sulfat (PT Halmahera Persada Lygend, 2023a).
[3]Disebutkan sebagai 54.000 ton metrik Ni per tahun oleh Durrant (2023).

[4]Disebutkan sebagai 55.875 ton metrik Ni per tahun oleh Hidayat et al. (2024).
[5] PT Halmahera Persada Lygend (2023a).
[6]Durrant (2023). Persentase kepemilikan yang disebutkan oleh Durrant (2023) berjumlah 110%.
[7]Disebutkan sebagai 55.655 ton metrik Ni per tahun oleh Hidayat et al. (2024).
[8]Disebutkan sebagai 65.000 ton metrik Ni per tahun oleh Fisher dan Grossl (2023).
[9]Disebutkan sebagai 6.000 ton metrik Co per tahun oleh Fisher dan Grossl (2023).
[10]IMIP (2025a).
[11]Nickel Industries (2025).
[12]Disebutkan sebagai 2022 oleh Fisher dan Grossl (2023).
[13]Juga disebutkan sebagai Jingmen GEM New Material (63%), Brunp (10%), EcoPro Global (9%), Tsingshan Holding Group (10%), Hanwa (8%) oleh Sangadji (2024).
[14]Disebutkan sebagai 30.000 ton metrik Ni per tahun dengan tambahan 30–60.000 ton metrik yang sedang dibangun oleh Fisher dan Grossl (2023).
[15]Disebutkan sebagai 65.000 ton metrik Ni per tahun oleh GEM Co. (2024).
[16]IMIP (2025b).
[17]Sangadji dan Ginting (2023).
[18]Nangoy (2023).
[19]Disebutkan sebagai 22.000 ton metrik Ni oleh IMIP (2025i).
[20]Merdeka Battery Materials (2025).
[21]Disebutkan sebagai kepemilikan penuh oleh GEM Co. dan dengan kapasitas tahunan 22.000 ton metrik Ni oleh IMIP (2025k).
[22]Disebutkan sebagai Kuartal I 2025 oleh Merdeka Battery Materials (2024).

Tabel 1b. Proyek HPAL di Indonesia: Telah mendapat izin dan/atau sedang dalam tahap konstruksi[1]

Nama	Lokasi	Kepemilikan	Kapasitas Tahunan (ton metrik)	Tahun Operasional
MBMA-CATL	Indonesia Konawe Industrial Park (IKIP), Sulawesi Tenggara	MBMA (66%), Ningbo Brunp Contemporary Amperex (afiliasi CATL) (34%)	60,000 Ni	2025[2]
PT Blue Sparkling Energy (BSE)	Weda Bay Industrial Park, Pulau Halmahera, Maluku Utara[3]	Harum Energy (51%)[4], Tsingshan, Holding Group	67,000 Ni 7500 Co[4]	2026
Pomalaa/PT Kolaka Nickel Indonesia (KNI)	Indonesia Pomalaa Industrial Park, Sulawesi Tenggara	Zhejiang Huayou Cobalt (53%), Vale Indonesia (30%), Ford (17%)[5,6]	120,000 Ni 15,000 Co[7]	2026
PT Excelsior Nickel Cobalt (ENC)[8]	Indonesia Morowali Industrial Park, Sulawesi Tengah	Nickel Industries (55%)[10], United Tractors (UNTR)	67,000 Ni[9]	2026
Sorowako/PT Huali Nickel Indonesia (HNI)	Sulawesi Selatan	Zhejiang Huayou, Cobalt, Vale Indonesia[11]	60,000 Ni 5000 Co[12]	2027
PT Ceria Nugraha Indotama[13,14]	Sulawesi Tenggara	—	146,0000 Ni+Co 110,900 Ni[15] 11,300 Co[15]	2028-2030
PT Green AGCO New Energy Materials[16]	—	Gem Co.	22,000 Ni	—
PT Sulawesi Nickel Cobalt (SNC)[17]	Indonesia Morowali Industrial Park, Sulawesi Tengah	Zhejiang Huayou Cobalt, Tsingshan Holding Group	60,000 Ni 80,000 Ni+Co[17] 80,000 Ni[18]	—
PT Green Eco Nickel[19,20]	Indonesia Morowali Industrial Park, Sulawesi Tengah	—	22,000 Ni	—

PT Seawing New Energy[21]	Indonesia Morowali Industrial Park, Sulawesi Tengah	Tsingshan Holding Group	60,000 Ni	—
PT Honch New Energy[22]	Indonesia Morowali Industrial Park, Sulawesi Tengah	Tsingshan Holding Group	60,000 Ni	—
PT Decho New Energy[23]	Indonesia Morowali Industrial Park, Sulawesi Tengah	Tsingshan Holding Group	60,000 Ni	—
PT Chengseng New Energy[24]	Indonesia Morowali Industrial Park, Sulawesi Tengah	Tsingshan Holding Group	60,000 Ni	—
PT Indonesia Qingmei Energy Materials[25]	Indonesia Morowali Industrial Park, Sulawesi Tengah	GEM Co.	22,000 Ni	—

[1]Data dari IndoPremier (2024) dan produk berupa presipitat hidroksida campuran kecuali dinyatakan lain.
[2]Dinyatakan sebagai akhir tahun 2027 oleh Merdeka Copper Gold (2024)
[3]Spence (2024)
[4]Argus (2024)
[5]Sangadji dan Ginting (2023)
[6]Dinyatakan sebagai Zhejiang Huayou Cobalt (73,2%), Vale Indonesia (18,3%), Ford (8,5%) oleh Sangadji (2024)
[7]Vale (2025)
[8]Produk berupa presipitat hidroksida campuran ditambah nikel sulfat dan katoda nikel (Nickel Industries, 2025).
[9]Dinyatakan sebagai 72.000 ton metrik Ni per tahun oleh Nickel Industries (2025)
[10]Nickel Industries (2025)
[11]PT Vale Indonesia (2023)
[12]Argus (2023)
[13]Semua data dari Nangoy dan Nguyen (2024) kecuali disebutkan lain.
[14]Produk berupa presipitat hidroksida campuran ditambah nikel sulfat dan tembaga sulfat (Nangoy dan Nguyen, 2024).
[15]Ceria Nugraha Indotama (2025)
[16]Sangadji (2024)
[17]Dinyatakan sebagai 80.000 ton metrik Ni + Co oleh IMIP (2025c)
[18]Dinyatakan sebagai 80.000 ton metrik Ni per tahun oleh Nangoy (2023)
[19]IMIP (2025d)

[20]Sebelumnya dikenal sebagai GEM Indonesia New Energy Materials (IMIP, 2025d)
[21]IMIP (2025e)
[22]IMIP (2025f)
[23]IMIP (2025g)
[24]IMIP (2025h)
[25]MIP (2025j)

Tabel 1c. Proyek HPAL di Indonesia: Diusulkan[1]

Nama	Lokasi	Kepemilikan	Kapasitas Tahunan (ton metrik)
IKIP 2	Indonesia Konawe Industrial Park (IKIP), Sulawesi Tenggara	MBMA	120,000 Ni
LG Energy - ANTM	—	LG Energy Solutions, Aneka Tambang	40,000-60,000 Ni
CATL - ANTM	—	CATL, Aneka Tambang	40,000-60,000 Ni
PT Ceria Kobalt Indotama	—	Ceria Nugraha Indotama	110,900 Ni
ANEM - Gotion	Sulawesi[2]	Anugrah New Energy Materials, Gotion	120,000 Ni
PT Halmahera Persada Lygend – Phase 3[3,4]	Obi Island, Maluku Utara	Trimegah Bangun Persada (45.1%), Ningbo Lygend Mining (54.9%)	60,000 Ni
Ningbo Contemporary Brunp Lygend (CBL)[5]	Halmahera Island, Maluku Utara	Ningbo Brunp Contemporary Amperex, Ningbo Lygend New Energy, Ningbo Meishan Free Trade Port Ruiting Investment Co.[5]	40,000 Ni[3]
Huabao[3]	Indonesia Huabao Industrial Park, Sulawesi Tengah	Nanjing Hanrui Cobalt[4]	60,000 Ni[3]
PT Ceria Nugraha Indotama[3]	Pulau Obi, Maluku Utara	—	40,000 Ni
Jinchuan[3]	Pulau Obi, Maluku Utara	—	20,000 Ni
PT Antam[3,6]	Pulau Halmahera Timur, Maluku Utara	—	75,000 Ni
Indonesia Huali Industrial Park (IHIP)[7]	Malili, Sulawesi Selatan	Zhejiang Huayou Cobalt	

[1]Data dari IndoPremier (2024) dan produk berupa presipitat hidroksida campuran kecuali dinyatakan lain.
[2]World Construction Network (2023)
[3]Durrant (2023)
[4]Asian Metal (2022)
[5]CBL (2025)
[6]Produk berupa nikel sulfat (Durrant, 2023).
[7]Produk berupa presipitat hidroksida campuran ditambah nikel sulfat (Durrant, 2023).

Tabel 1d. Proyek HPAL di Indonesia: Dihentikan atau Dibatalkan[1]

Nama	Lokasi	Kepemilikan	Kapasitas Tahunan (ton metrik)
Sonic Bay	Weda Bay Industrial Park, Pulau Halmahera, Maluku Utara[2]	Eramet (51%), BASF (49%)	60,000 Ni
Huashan	Weda Bay Industrial Park, Pulau Halmahera, Maluku Utara[2]	Zhejiang Huayou Cobalt (68%), Glaucous (32%)[3]	123,000 Ni[4,5] 15,000 Co[6]

[1]Data dari IndoPremier (2024) dan produk berupa presipitat hidroksida campuran kecuali dinyatakan lain.
[2]Sangadji et al. (2019)
[3]SMM (2022)
[4]Disebutkan sebagai 120.000 ton metrik Ni per tahun oleh Argus (2023)
[5]Disebutkan sebagai 120.000 ton metrik Ni per tahun oleh SMM (2022)
[6]Argus (2023)

Tabel 2. Proyek HPAL Sebelum Proyek Pertama di Indonesia[1]

Tahun Operasional	Negara	Proyek	Kapasitas Tahunan (ton metrik)	Metode Pembuangan Tailing
1959	Kuba	MOA	32,000 Ni 2000 Co	Bendungan Tailing Konvensional[2]
1998	Australia	Bulong	9000 Ni 700 Co	Bendungan Tailing Konvensional[3]
1998	Australia	Murin Murin	45,000 Ni 3000 Co	Bendungan Tailing Konvensional[4]
2000	Australia	Cawse	9000 Ni 1300 Co	Bendungan Tailing Konvensional[5]
2005	Filipina	Coral Bay	18,000 Ni 1500 Co	Bendungan Tailing Konvensional[6]
2008	Australia	Ravensthorpe	50,000 Ni 1400 Co	Bendungan Tailing Konvensional[6]
2009	Kaledonia Baru	Goro	60,000 Ni 5000 Co	Bendungan Tailing Konvensional[7]

2012	Papua Nugini	Ramu	30,000 Ni 3000 Co	Pembuangan ke laut dalam[8]
2012	Madagascar	Ambatovy	60,000 Ni 5000 Co	Bendungan Tailing Konvensional[6]
2013	Filipina	Taganito	30,000 Ni 2600 Co	Bendungan Tailing Konvensional[6]
2015[9]	Turki	Gördes	10,000 Ni 750 Co	Bendungan Tailing Konvensional

[1]Semua data dari Gultom dan Sianipar (2020) kecuali dinyatakan lain.
[2]Sherritt International Corporation (2025)
[3]Senversa (2020)
[4]Glencore (2023)
[5]Woodward-Clyde (1996)
[6]UNEP et al. (2025)
[7]Mining.com (2022)
[8]MRDC (2025)
[9]Birol (2023)

Aspek inovatif yang paling mencolok dari ledakan proyek HPAL di Indonesia saat ini adalah penggabungan teknologi HPAL dengan teknologi tailing yang difilter. Tailing adalah campuran basah berupa partikel batuan dan tanah yang telah dihancurkan, bersama dengan reagen kimia serta produk reaksi dan degradasinya, yang tersisa setelah komoditas bernilai — seperti endapan hidroksida campuran nikel dan kobalt — diekstraksi dari bijihnya. Dalam teknologi tailing yang difilter, tailing disaring untuk mengurangi kandungan air secara geoteknik hingga mencapai tingkat di mana tailing dapat dipadatkan di dalam fasilitas penyimpanan tailing yang difilter (lihat Gambar 4). Teknologi tailing yang difilter dianggap sebagai praktik terbaik karena dapat mengurangi kemungkinan terjadinya pelikuidan dan keruntuhan fasilitas penyimpanan tailing, menurunkan dampak jika keruntuhan terjadi, memperkecil jejak (footprint) dari fasilitas penyimpanan tailing, memudahkan penutupan fasilitas secara aman, dan mengurangi konsumsi air secara keseluruhan dalam kegiatan penambangan (*Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel*, 2015; Morrill et al., 2022). Hingga saat ini, semua proyek HPAL di Indonesia menggunakan teknologi tailing yang difilter (Fisher dan Grossl, 2023; Heyokha Brothers, 2024; Hidayat et al., 2024), dan banyak proyek HPAL yang telah memperoleh izin — seperti PT Kolaka Nickel Indonesia (KNI) di kawasan Indonesia Pomalaa Industrial Park yang direncanakan di Provinsi Sulawesi Tenggara dan PT Huali Nickel Indonesia (HNI) di Sulawesi Selatan (lihat Tabel 1b dan Gambar 3) — telah menyatakan niat mereka untuk menerapkan teknologi tailing yang difilter (Silva et al., 2023). Istilah tidak baku seperti "*dry tailings*" dan "*dry stacking*" akan dibahas secara kritis dalam bagian "Tutorial."

Alternatif dari penggunaan teknologi tailing yang difilter adalah penyimpanan tailing basah di atas permukaan tanah dalam fasilitas penyimpanan tailing konvensional. Semua proyek HPAL sebelumnya menggunakan fasilitas penyimpanan tailing konvensional, kecuali proyek Ramu di Papua Nugini yang menggunakan pembuangan tailing ke laut dalam (lihat Tabel 2). Pembuangan tailing ke laut tidak disarankan dalam kondisi apa pun (Morrill et al., 2022). Pada tahun 2021, pemerintah Indonesia mengumumkan bahwa tidak ada izin baru yang akan diterbitkan untuk pembuangan tailing ke laut dalam (Nangoy dan Ungku, 2021), meskipun peraturan perlindungan lingkungan yang dikeluarkan Indonesia pada tahun yang sama masih mencakup ketentuan tentang pembuangan tailing ke laut dalam (Pemerintah Republik Indonesia,

2021). Dengan demikian, pembuangan tailing langsung ke sungai tanpa penahanan tidak disarankan dalam kondisi apa pun (Morrill et al., 2022).

Tidak ada studi yang menyatakan bahwa tailing HPAL ideal untuk penerapan teknologi tailing yang difilter, terutama tidak di iklim tropis dimana terdapat tingkat kegempaan tinggi seperti di Indonesia. Masalahnya adalah bahwa kadar air geoteknik optimum untuk pemadatan maksimum biasanya hanya terpaut beberapa persen di bawah kadar air jenuh, sehingga curah hujan tinggi dapat dengan mudah menjenuhkan kembali tailing tersebut. Tailing yang jenuh dapat menjadi tidak stabil secara fisik bahkan dalam kondisi statik, sementara kombinasi tailing yang jenuh dengan aktivitas seismik menyebabkan potensi ketidakstabilan menjadi lebih besar. Masalah lainnya adalah curah hujan tinggi dapat menyebabkan erosi pada tumpukan tailing yang difilter. Menurut Firdau (2022), "Teknologi ini, yang menggunakan asam dalam kondisi panas dan tekanan tinggi untuk mengeluarkan nikel dari bijih mentah, belum pernah diuji sebelumnya di Indonesia, yang sering mengalami gempa bumi, hujan deras, dan tanah longsor, sehingga menjadikannya sangat berisiko dalam pengangkutan dan penyimpanan limbah berbahaya." Menurut Lee (2023), "*Dry-stacking* menjadi tantangan di negara yang memiliki curah hujan tinggi dan aktivitas seismik yang sering terjadi." Menurut Guberman et al. (2024), "*Dry stacking* dianggap sebagai opsi terbaik untuk Indonesia dalam menangani limbah tambang. Namun, stabilitas tumpukan dan masalah erosi belum ditelaah secara khusus untuk geografi negara ini, yang dapat terpapar dampak negatif dari hujan lebat dan gempa bumi." Sangadji (2024) menyimpulkan, "Mengkhawatirkan pula bahwa perusahaan-perusahaan ini mengoperasikan fasilitas tailing yang difilter di daerah beriklim sangat basah atau daerah dengan curah hujan tinggi yang juga dikategorikan sebagai daerah rawan bencana (gempa bumi frekuensi tinggi, tanah longsor dan banjir)." Panduan tailing yang difilter dari BHP Rio Tinto Tailings Management Consortium (2024) melihat erosi tumpukan tailing yang difilter sebagai tantangan utama di wilayah bercurah hujan tinggi, meskipun tidak secara spesifik merujuk ke Indonesia. Menurut BHP Rio Tinto Tailings Management Consortium (2024), "Lereng tumpukan yang tidak dipadatkan di daerah curah hujan tinggi dapat mengalami erosi cepat dan membentuk alur besar. Disarankan agar area ini dipadatkan dengan alat berat untuk meminimalkan erosi. Tailing yang tertutup dan dipadatkan relatif tahan terhadap erosi kecuali dalam hujan lebat dan/atau aliran permukaan yang terkonsentrasi."

Gambar 4. Pemandangan panorama fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Indonesia. Lokasi tepatnya tidak dinyatakan. Foto dari Fisher dan Grossl (2023).

Curah hujan dan aktivitas kegempaan yang tinggi menyebabkan sebagian perusahaan tambang menyimpulkan bahwa pembuangan ke laut dalam adalah satu-satunya opsi yang dapat dijalankan di Indonesia. Faktanya, setahun sebelum PT Halmahera Persada Lygend (HPL) membuka proyek HPAL pertama di Indonesia, karyawan manajerial PT HPL menulis, "Penerapan tailing untuk wilayah tropis Halmahera kurang sesuai. Wilayah tropis Halmahera, khususnya di Pulau Obi, adalah daerah aktif gempa bumi dengan curah hujan 3.000 mm/tahun, dan ±7.000 penduduk tinggal di desa hilir. Karena kondisi ini, biaya konstruksi dan pengendalian air akan sangat tinggi dan secara ekonomi tidak layak untuk proyek. Komposisi utama residu akan dipompa ke DSTP [Pembuangan Tailing ke Laut Dalam]" (Gultom dan Sianipar, 2020). Menurut Sanderson (2022), "Di tambang nikel Ramu yang dimiliki oleh perusahaan Tiongkok di negara tetangga Papua Nugini, limbah tambang dibuang langsung ke laut dalam, sebuah proses yang dapat menutupi dasar laut dan merusak ekosistem laut jika limbah tersebut naik ke permukaan. Perusahaan-perusahaan Tiongkok di Indonesia awalnya ingin menggunakan proses yang sama tetapi setelah adanya keberatan dari pemerintah, tampaknya mereka akan menampung limbah mereka di daratan, menggunakan proses yang disebut 'dry-stack tailings'. Ningbo Lygend, perusahaan Tiongkok yang membangun pabrik pengolahan nikel di Indonesia untuk pasar baterai kendaraan listrik, baru-baru ini memperingatkan dalam pengajuan pencatatan saham di bursa saham Hong Kong bahwa ini akan lebih mahal." Ningbo Lygend Mining adalah pemilik mayoritas (54,9%) PT HPL (lihat Tabel 1a; IndoPremier, 2024).

Faktor komplikasi tambahan terkait tailing HPAL adalah bahwa, karena sifatnya yang berbutir halus dan karakter kimiawinya yang kompleks akibat reagen yang ditambahkan untuk menetralisir tailing setelah pelindian asam, kadar air optimum untuk pemadatan maksimum jauh lebih tinggi dibanding tailing dari batuan keras. Jika target kadar air geoteknik untuk tailing yang difilter biasanya adalah 15% (Klohn Crippen Berger, 2017; Crystal et al., 2018), maka kadar air target untuk tailing HPAL yang difilter berada pada kisaran 30–35% (SRK Consulting, 2022a; Lu, 2023; Souisa, 2023; Heyokha Brothers, 2024; Huayou Cobalt, 2023; Zhejiang Huayou Cobalt, 2024). Meskipun tailing yang difilter seharusnya tidak mengandung air bebas saat dipadatkan dalam tumpukan tailing yang difilter, berat dari tailing di atasnya akan menyebabkan

pelepasan lebih banyak air dari tailing di bawahnya, yang harus dikelola untuk mencegah kejenuhan ulang. Menurut laporan konsultan dari Hatch (2020) untuk PT Halmahera Persada Lygend (HPL), "Tailing yang difilter sebagaimana dirancang memiliki kadar air 30% pada kondisi lokal. Seiring waktu, pemadatan tailing ini akan menghasilkan jumlah air yang substansial ... Ini menunjukkan bahwa sistem drainase internal dalam tumpukan tailing juga diperlukan untuk menurunkan muka air tanah dan mengurangi risiko ketidakstabilan lereng dan likuifaksi tailing."

Sebuah studi yang dilakukan oleh Hatch untuk Prony Resources New Caledonia dua tahun kemudian menemukan bahwa teknologi filter press saat ini masih belum mampu mencapai kadar air optimal yang mencukupi sesuai yang dibutuhkan untuk tailing HPAL pada proyek New Caledonia. Menurut Bodley dan Vaguener (2022), "Selama studi tingkat kelayakan, ditetapkan target OMC [Optimum Moisture Content] sebesar 33%, yang sesuai dengan kadar padatan residu sebesar 75%. Filter press mengalami kesulitan untuk menghasilkan residu yang lebih kering dari 73% padatan [yang setara dengan kadar air geoteknik sebesar 37%]. Uji coba lapangan menunjukkan bahwa OMC residu tidak akan mencapai tingkat yang diinginkan dengan hanya proses filtrasi … Kadar kelembaban dalam residu diukur dari sampel yang dibuang dari pabrik DWP1 dan umumnya ditemukan lebih dari 3% lebih basah dari OMC target yang diestimasi pada studi kelayakan." Karena teknologi filter press saat ini tidak dapat mencapai kadar air geoteknik yang dibutuhkan, maka tailing perlu dikeringkan di lapangan sebelum dipadatkan. Bodley dan Vaguener (2022) menjelaskan kesulitannya, "Ini menunjukkan bahwa filtrasi saja tidak cukup untuk memenuhi kebutuhan lapangan dan residu memerlukan penyesuaian di lapangan untuk mencapai spesifikasi pemadatan yang lebih tinggi sebagai material struktural. Penyesuaian residu selama musim hujan sulit dilakukan karena seringnya turun hujan deras." Sebagai klarifikasi, dalam teknik geoteknik, kadar air geoteknik adalah massa air dibagi massa padatan kering, sementara kadar padatan adalah massa padatan dibagi total massa (padatan + air). Oleh karena itu, kadar padatan dan kadar air geoteknik tidak berjumlah 100%.

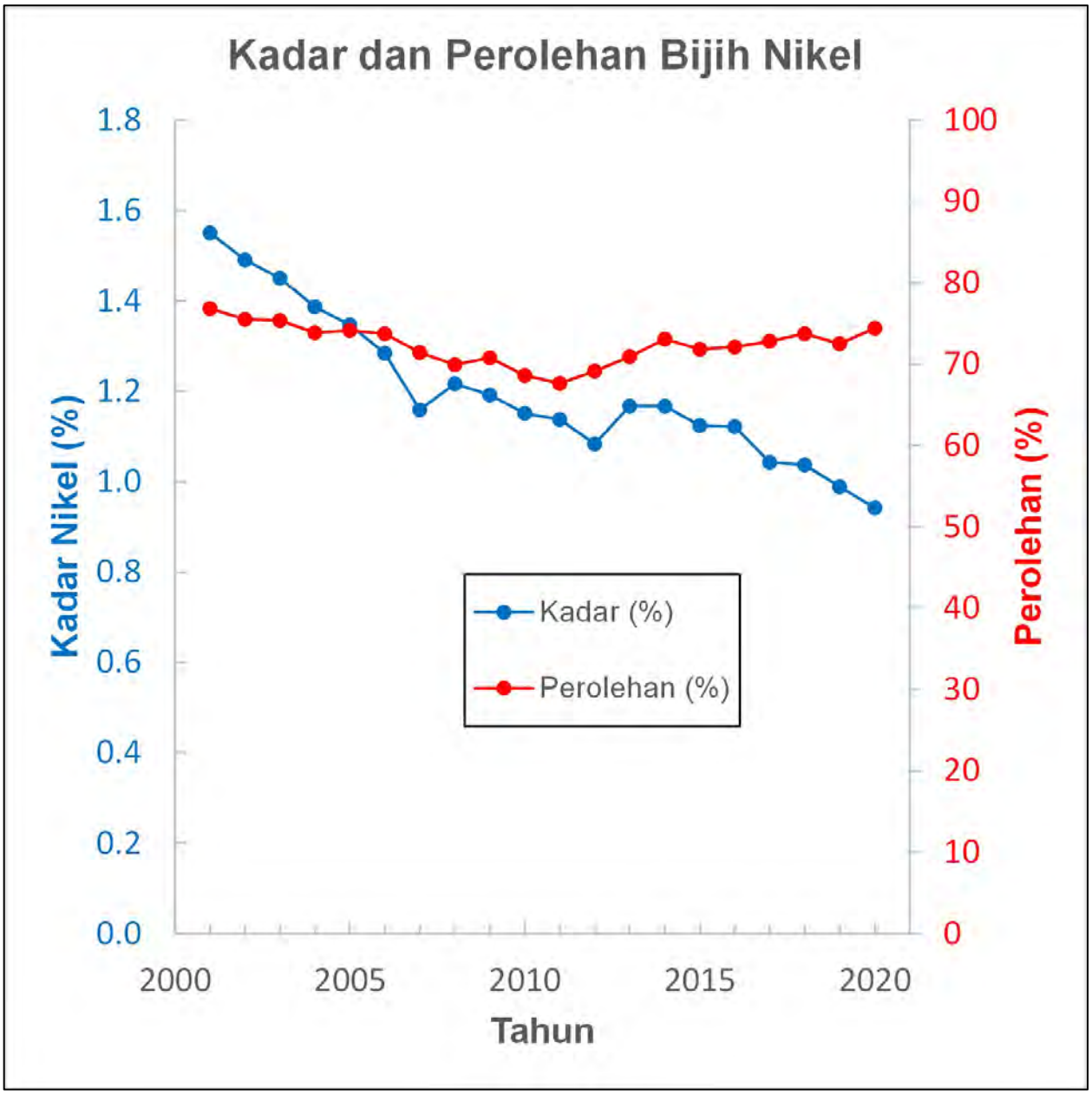
Karena tailing HPAL masih belum mencapai titik jenuh yang diinginkan bahkan setelah difilter, maka sulit untuk memadatkan tailing tersebut tanpa mengeluarkan lebih banyak air, bahkan menjalankan alat berat di atas tailing untuk pemadatan sulit dilakukan. Menurut Bodley dan Vaguener (2022), "Hasil uji lapangan menunjukkan tingkat kejenuhan berkisar antara 90% hingga 95%, sedangkan garis optimum berkorelasi dengan tingkat kejenuhan adalah antara 80% hingga 85%. Ini menunjukkan tingkat kejenuhan yang lebih tinggi dibandingkan dengan hasil uji laboratorium terhadap residu pada studi kelayakan. Banyak sampel menunjukkan tingkat kejenuhan yang sangat tinggi, sehingga kesulitan pemadatan di lapangan diamati dalam kondisi residu yang lebih basah … Akses kendaraan ke dan di atas tumpukan terhambat oleh kondisi tanah yang basah. Hal ini terutama terlihat saat truk dump artikulasi 30 ton (ADT) dengan ban lebar standar melintasi jalur sebelumnya dan terlihat kerusakan berupa bekas roda … Dalam kondisi basah tantangan terbesar adalah kondisi yang licin … Praktik terbaik pengelolaan air permukaan telah diterapkan selama konstruksi bentang alam residu yang difilter, namun hujan lebat tetap sangat memengaruhi produktivitas dan kualitas penempatan material. Residu yang difilter tidak dapat dipadatkan selama atau setelah kejadian hujan seperti itu (misalnya ketika ambang batas tipikal melebihi 10 mm per 24 jam)."

Satu-satunya solusi yang diajukan oleh Bodley dan Vaguener (2022) adalah menempatkan tailing yang terlalu basah di area non-kritis pada fasilitas penyimpanan tailing yang difilter lalu menimbun tailing selama periode sangat basah sementara pemadatan dilakukan

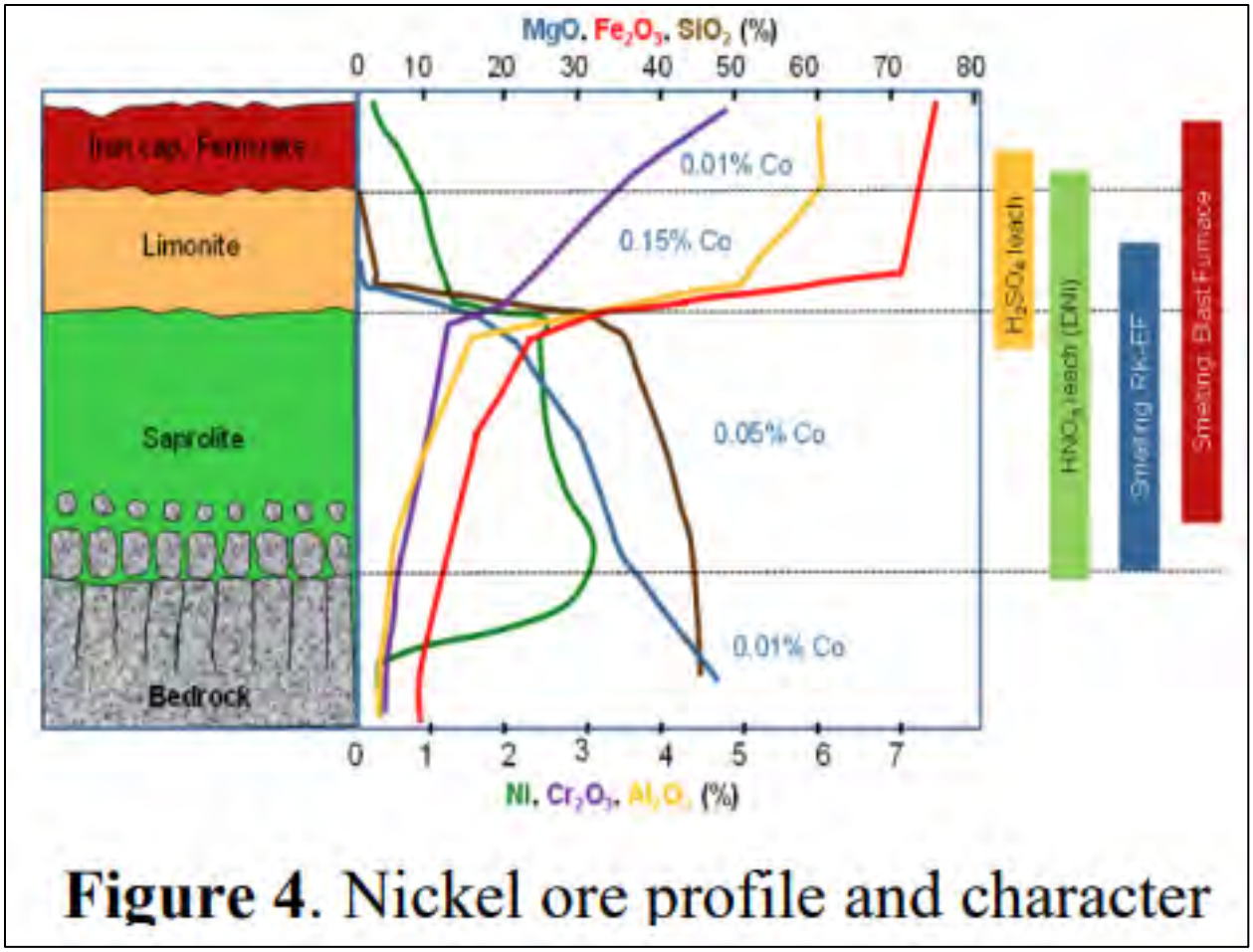
kemudian saat musim kering. Menurut Bodley dan Vaguener (2022), “Oleh karena itu sangat penting bahwa setiap bentang alam residu yang difilter dalam lingkungan seperti itu mencakup zona non-struktural atau spesifikasi non-utama di mana ‘cake’ yang lebih basah yang dihasilkan selama musim hujan dapat disimpan tanpa memerlukan penanganan ulang yang sesungguhnya tidak perlu. Opsi lain seperti penimbunan sementara selama musim hujan di pabrik dapat dipertimbangkan tergantung pada ketersediaan ruang.” Solusi di atas, pada kenyataannya, merupakan praktik standar di hampir semua fasilitas penyimpanan tailing yang difilter. Selain itu, penulis tidak mengetahui apakah ada publikasi teknis yang mengusulkan solusi terhadap permasalahan tailing yang difilter di daerah-daerah beriklim tropis.

Banyak hal telah disampaikan terkait limbah tambang yang dihasilkan oleh teknologi HPAL. Menurut Sangadji dan Ginting (2023), “Diperkirakan setiap satu ton logam nikel yang diproses melalui HPAL menghasilkan 100 ton residu.” Penambahan reagen ke bijih dan pembentukan produk reaksi menyebabkan peningkatan massa bijih bahkan setelah komoditas bernilai telah diekstraksi. Menurut Hidayat et al. (2024), “Sekitar 1,3 ton tailing (basis kering) dihasilkan untuk setiap ton limonit [jenis bijih laterit] yang diproses.” Fisher dan Grossl (2023) merangkum, “HPAL terkenal karena besarnya volume tailing akibat alur prosesnya. Umumnya pemrosesan menghasilkan volume tailing sebesar 1,25 kali dari bijih yang diproses. Sebagai contoh, Huayue menghasilkan sekitar 70.000 ton Ni per tahun. Dengan bijih 1%, itu berarti mengkonsumsi sekitar 7 juta ton bijih limonit setiap tahun dan tailing yang dihasilkan sekitar 8,75 juta ton per tahun,” yang berarti rasio limbah terhadap logam sebesar 125. Rasio limbah terhadap logam untuk proses HPAL akan dihitung ulang pada bagian “Ringkasan Fasilitas Penyimpanan Tailing yang Difilter di Indonesia” dalam laporan ini.

Secara adil, perlu disampaikan bahwa pemrosesan bijih nikel dengan HPAL sebenarnya menghasilkan lebih sedikit limbah dibandingkan dengan penambangan batuan keras untuk nikel. Secara global, kadar bijih nikel yang ditambang menurun dari 1,55% pada tahun 2001 menjadi 0,94% pada tahun 2020, sementara tingkat perolehan tetap stabil di kisaran 68–82% (Foss dan Koelsch, 2022; lihat Gambar 5). Sebaliknya, untuk lapisan limonit dari bijih laterit, konsentrasi nikel berada di kisaran 0,8–1,5% (Gultom dan Sianipar, 2020; lihat Gambar 6). Faktor lain yang perlu dipertimbangkan adalah bahwa dua jenis limbah tambang yang utama adalah tailing dan batuan penutup, yaitu batuan yang harus dibuang untuk mencapai lapisan bijih. Limbah batuan dalam jumlah besar dihasilkan oleh penambangan nikel batuan keras, terutama pada tambang terbuka, sementara ekstraksi bijih laterit hanya menghasilkan sedikit limbah batuan atau *overburden* karena bijih laterit cenderung berada di permukaan atau tepat di bawahnya. Menurut Nassar et al. (2022a-b), rerata global untuk penambangan nikel adalah produksi 1,36 ton limbah batuan untuk setiap ton bijih, kadar bijih 0,82%, tingkat perolehan konsentrator 79%, dan tingkat perolehan peleburan/pemurnian 90%, menghasilkan rasio limbah terhadap logam sebesar 230, atau sekitar dua kali lipat dari rasio teknologi HPAL. Rerata yang sesuai untuk penambangan kobalt global adalah produksi 2,12 ton limbah batuan untuk setiap ton bijih, kadar bijih 0,12%, tingkat perolehan konsentrator 55%, dan tingkat perolehan peleburan/pemurnian 90%, menghasilkan rasio limbah terhadap logam sebesar 859 (Nassar et al., 2022a-b). Dengan demikian, kadar bijih kobalt batuan keras yang khas sebesar 0,12% mirip dengan kadar kobalt khas dari lapisan limonit pada bijih laterit sebesar 0,15% (Gultom dan Sianipar, 2020; lihat Gambar 6). Namun, sebagaimana halnya dengan produksi nikel, pemrosesan HPAL untuk kobalt menghasilkan sekitar sepertiga limbah tambang dibandingkan penambangan kobalt batuan keras karena jumlah limbah batuan yang jauh lebih besar dihasilkan oleh penambangan batuan keras.



Gambar 5. Secara global, kadar bijih nikel yang ditambang menurun dari 1,55% pada tahun 2001 menjadi 0,94% pada tahun 2020, sementara tingkat perolehan tetap stabil di kisaran 68–82%. Data dari Foss dan Koelsch (2022).



Gambar 6. Pada lapisan limonit dari bijih laterit, konsentrasi nikel berada dalam kisaran 0,8–1,5%, sementara konsentrasi kobalt umumnya sekitar 0,15%. Gambar dari Gultom dan Sianipar (2020).

Meskipun tidak ada yang pernah berargumen bahwa tailing dari proses HPAL adalah ideal atau bahkan sesuai untuk diterapkan dalam teknologi tailing yang difilter, penggabungan antara teknologi HPAL dan teknologi tailing yang difilter menyatukan dua gagasan:

1) Produksi nikel dan kobalt perlu diperluas secara cepat untuk mendukung transisi global dari kendaraan berbahan bakar fosil ke kendaraan listrik.
2) Teknologi tailing yang difilter dianggap sebagai pilihan yang lebih tidak merusak lingkungan dibandingkan alternatif lainnya.

Dengan demikian, meskipun jarang dinyatakan secara eksplisit, kombinasi antara teknologi HPAL dan teknologi tailing yang difilter diposisikan sebagai paket "hijau" yang utuh. Keterkaitan ini secara eksplisit disampaikan oleh Heyokha Brothers (2024) dalam artikel mereka yang berjudul *"The myths surrounding Indonesia's Nickel Revolution: Fact or fiction?"* ["Mitos-mitos seputar Revolusi Nikel Indonesia: Fakta atau fiksi?"] Menurut Heyokha Brothers (2024): "Seiring dengan meningkatnya peran Indonesia di pasar nikel global, cadangan strategis dan keunggulan geografisnya menempatkan Indonesia sebagai pusat industri kendaraan listrik (EV). Dengan memelopori pengembangan rantai pasokan EV yang lengkap — dari tambang hingga kendaraan — Indonesia sedang menjalankan inisiatif luar biasa menuju energi berkelanjutan … Dalam satu dekade terakhir, Indonesia telah mengambil langkah proaktif dengan mengadopsi

teknologi-teknologi maju seperti High-Pressure Acid Leach (HPAL), menerapkan regulasi lingkungan yang ketat, dan berinovasi dalam solusi pengelolaan limbah yang lebih ramah lingkungan … Indonesia memiliki cadangan bijih limonit yang melimpah dan berpotensi memimpin inisiatif hijau melalui metode ini … Teknologi HPAL telah meningkatkan praktik pengelolaan limbah dalam industri nikel Indonesia secara signifikan, dan menetapkan standar baru dalam tanggung jawab lingkungan. Proses HPAL menghasilkan tailing yang terutama terdiri atas sisa-sisa besi dan magnesium dengan kadar air sekitar 35%. Limbah ini kemudian diproses dan ditimbun kering agar memenuhi standar pemerintah daerah … Mengelola limbah hasil pemrosesan nikel sebagai tailing kering daripada tailing basah memberikan keuntungan lingkungan yang besar, karena tailing kering lebih stabil, lebih aman bagi lingkungan, dan menggunakan lebih sedikit air … Indonesia telah menjadi kekuatan penyeimbang yang memastikan pasokan bahan baterai yang ekonomis dan skalabel, membuktikan bahwa pembangunan ekonomi dan tanggung jawab lingkungan benar-benar dapat berjalan berdampingan dan tumbuh bersama untuk mencapai target transisi energi global dan tujuan net-zero."

Salah satu ciri dari kapitalisme lanjut [*late capitalism*] adalah kemunculan teknologi disruptif, yaitu inovasi yang pada awalnya inferior atau ditujukan pada ceruk pasar yang kurang terlayani, namun dengan cepat menggantikan teknologi yang sudah ada — seringkali dengan menawarkan keunggulan lain seperti kemudahan, keterjangkauan, atau aksesibilitas. Salah satu contohnya adalah kecerdasan buatan generatif [*generative artificial intelligence*], yang kini mulai menggantikan tulisan orisinal karena keunggulannya dalam kecepatan dan kemudahan, meskipun hasilnya dianggap lebih rendah kualitasnya. Moto *"Bergerak cepat dan hancurkan sesuatu"* telah dikaitkan dengan berbagai teknologi disruptif dan para pendukungnya, yang mencerminkan dua sisi dari kreativitas — inovasi di satu sisi dan tindakan tanpa mempertimbangkan konsekuensinya di sisi lain (Taplin, 2017). Konsep-konsep yang terkait dan dikembangkan secara khusus dalam konteks teknologi tailing yang difilter adalah *"Kreativitas Ceroboh"* [*Reckless Creativity*] (Emerman, 2021a–b; 2022a–b) dan *"Euforia Desain"* [*Design Euphoria*] (Riskope, 2022). Menurut Emerman (2021a, 2022b), *Kreativitas Ceroboh* memiliki satu atau lebih dari karakteristik berikut:

1) Tidak ada landasan bertahap (scaffolding), artinya inovasi baru tidak dibangun di atas inovasi sebelumnya melalui serangkaian langkah antara yang disertai dengan pengujian dan verifikasi yang memadai pada setiap tahap.
2) Satu atau lebih teknologi yang dibutuhkan untuk menjalankan inovasi tersebut saat ini belum tersedia.
3) Prediksi didasarkan pada nilai input tunggal atau skenario terbaik, tanpa mempertimbangkan rentang kemungkinan input lainnya.
4) Meskipun masalah potensial dikenali, masalah tersebut dengan cepat dianggap tidak relevan tanpa alasan yang jelas.
5) Langkah-langkah pencegahan dasar tidak dilakukan, padahal langkah-langkah tersebut merupakan prosedur rutin dalam inovasi-inovasi sebelumnya.
6) Tidak ada pertimbangan terhadap konsekuensi jika prediksi atau asumsi terbukti keliru, yakni terhadap konsekuensi dari kegagalan.

Tesis dari laporan ini adalah bahwa ledakan cepat dari kombinasi teknologi high-pressure acid leaching (HPAL) dan tailing yang difilter di Indonesia merupakan contoh teknologi disruptif sekaligus kegagalan yang katastropik. Frasa *"kegagalan yang katastropik"* digunakan dalam dua

makna: pertama, sebagai kegagalan katastropik dari suatu teknologi atau fenomena; dan kedua, sebagai kegagalan katastropik dalam arti sebenarnya, yaitu keruntuhan fisik dari fasilitas penyimpanan tailing tertentu. Istilah *"kegagalan"* juga dibedakan dari *"kegagalan yang katastropik"*, baik dalam konteks teknologi maupun fasilitas penyimpanan tailing secara individu. *"Kegagalan"* merujuk pada ketidakterpenuhinya tujuan desain, sementara *"kegagalan yang katastropik"* merujuk pada kecepatan dan besarnya dampak yang ditimbulkan oleh kegagalan tersebut.

Pembedaan antara *kegagalan* dan *kegagalan yang katastropik* merupakan standar dalam berbagai dokumen panduan keselamatan bendungan tailing. Menurut FEMA (2004), "Setiap kerusakan atau kelainan yang berada di luar asumsi dan parameter desain yang berdampak negatif pada fungsi utama bendungan untuk menahan air, secara tepat dikategorikan sebagai kegagalan. Kegagalan tingkat ringan ini dapat berkembang secara progresif atau meningkatkan risiko terjadinya kegagalan yang katastropik." Meskipun FEMA (2004) terutama membahas bendungan penahan air, dokumen yang sama menjelaskan bahwa, "Selain struktur konvensional, definisi 'bendungan' ini secara khusus mencakup 'bendungan tailing,' yaitu tanggul yang dibangun dari limbah buangan dan berfungsi menahan kolam pembuangan." ANCOLD (2012, 2019) mendefinisikan "kegagalan" sebagai "terjadinya suatu peristiwa di luar ekspektasi desain atau kondisi izin fasilitas, yang dapat mencakup pelepasan air secara tak terkendali termasuk rembesan, hingga ketidakstabilan besar pada tanggul yang menyebabkan hilangnya tailing dan/atau air." Menurut Canadian Dam Association (2021), "kegagalan bendungan tailing secara umum dapat didefinisikan sebagai ketidakmampuan bendungan untuk memenuhi maksud desainnya, baik dalam hal manajemen, operasional, struktur, maupun fungsi lingkungan, yang mengakibatkan potensi hilangnya nyawa, kerugian bagi para pemangku kepentingan, atau dampak lingkungan yang merugikan. Untuk keperluan Buletin ini [yang merujuk pada kegagalan katastropik], kegagalan bendungan tailing didefinisikan sebagai kerusakan fisik pada bendungan yang diikuti oleh pelepasan material yang disimpan secara tidak terkendali, biasanya tiba-tiba dan bersifat katastropik (misalnya cairan, tailing, lumpur, dan sebagainya)." Dokumen FEMA <u>*Tailings Dam Safety Best Practices*</u> adalah yang paling eksplisit dalam mendefinisikan "kegagalan" sebagai "hilangnya fungsi dari suatu komponen, sistem, atau proses"*, dan* "kegagalan yang katastropik" *sebagai* "pelepasan tak terkendali dari isi fasilitas penyimpanan tailing ke lingkungan hilir yang menyebabkan kerusakan signifikan di area hilir, termasuk potensi hilangnya nyawa atau dampak buruk lainnya terhadap manusia, kerusakan lingkungan, kerusakan properti atau infrastruktur, atau kerugian finansial bagi pemilik fasilitas dan/atau pemangku kepentingan lainnya" (FEMA, 2025). Meskipun tidak dinyatakan secara eksplisit dalam dokumen panduan mana pun, setiap kegagalan fasilitas penyimpanan tailing yang menyebabkan setidaknya satu korban jiwa seharusnya dianggap sebagai *"kegagalan yang katastropik"*, terlepas dari jumlah air atau tailing yang dilepaskan.

Kegagalan katastropik ditandai oleh dua aspek penting, yakni kecepatan terjadinya dan luasnya dampak yang merugikan — sebagaimana dicontohkan dalam dokumen <u>*Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management*</u> (Morrill et al., 2022). Menurut <u>*Safety First,*</u> "Dokumen ini merumuskan pedoman yang bertujuan mencegah kegagalan yang katastropik, yang didefinisikan sebagai kegagalan yang merupakan kejutan cepat dan terjadi tanpa peringatan (meskipun sebenarnya dapat diperkirakan sebelumnya)" (Morrill et al., 2022). <u>*Safety First*</u> juga mengutip <u>*Global Industry Standard on Tailings Management*</u> (GISTM) (ICMM–UNEP–PRI, 2020), yang mendefinisikan "kegagalan katastropik" sebagai "kegagalan

fasilitas tailing yang menyebabkan gangguan material terhadap sistem sosial, lingkungan, dan ekonomi lokal" serta menyatakan bahwa "peristiwa yang bersifat katastropik umumnya melibatkan berbagai dampak merugikan dalam skala yang berbeda-beda dan dalam rentang waktu yang berbeda, termasuk hilangnya nyawa, kerusakan terhadap infrastruktur fisik atau aset alam, serta gangguan terhadap kehidupan, mata pencaharian, dan ketertiban sosial."

Untuk mempermudah pembacaan bagi kalangan non-spesialis atau awam, bagian selanjutnya dari laporan ini berbentuk tutorial mengenai aspek-aspek penting pertambangan dalam konteks Indonesia, termasuk bijih laterit dan proses high-pressure acid leaching (HPAL), pelikuidan, berbagai alternatif pembuangan tailing tambang, teknologi tailing yang difilter, metode kesetimbangan batas dan faktor keamanan, model deterministik dan statistik untuk analisis kegagalan fasilitas tailing, pengasaman tambang dan pelindian logam, peraturan tailing di Indonesia, serta dokumen panduan *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management*. Tutorial ini diikuti dengan ringkasan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Indonesia dan kemudian pembahasan fasilitas-fasilitas tersebut dalam konteks batas kemampuan teknologi saat ini untuk tailing yang difilter. Bagian umum ini dilanjutkan dengan analisis rinci mengenai kegagalan katastropik yang mengancam di Pulau Obi dan kegagalan katastropik yang sedang berlangsung di kawasan Indonesia Morowali Industrial Park di Pulau Sulawesi. Laporan ini ditutup dengan tinjauan terhadap jalur-jalur berisiko yang mungkin terjadi ke depan, alternatif jalur yang dapat diambil, serta rekomendasi khusus untuk pemerintah Indonesia.

TUTORIAL MENGENAI ASPEK-ASPEK PENTING PERTAMBANGAN DI INDONESIA

Bijih Laterit dan Pelindian Asam Tekanan Tinggi

Laterit adalah tanah yang terkonsolidasi dan terkementasi yang terbentuk melalui pelapukan kimiawi jangka panjang dari batuan ultramafik di iklim tropis dan subtropis. Laterit mengalami pengayaan unsur besi dan aluminium karena unsur-unsur tersebut relatif tidak larut, sedangkan unsur-unsur umum lainnya dalam batuan dan tanah terlarut dan tercuci. Ketika laterit dianggap sebagai sumber nikel dan kobalt, dan kadang-kadang juga besi dan kromium, maka disebut sebagai bijih laterit. Dua jenis utama bijih laterit adalah bijih limonit dan bijih saprolit. Bijih limonit merupakan hasil pelapukan yang lebih dalam dan membentuk bagian atas profil laterit, sedangkan bijih saprolit kurang lapuk, membentuk bagian bawah profil laterit, dan secara bertahap menyatu dengan batuan dasar ultramafik (lihat Gambar 6). Konsentrasi nikel yang khas adalah 0,8–1,5% untuk bijih limonit dan 1,5–3% untuk bijih saprolit.

Bijih saprolit diproses menggunakan tanur listrik putar (RKEF) di mana besi dan nikel dilebur untuk membentuk paduan feronikel. Setelah slag dipisahkan, feronikel yang dihasilkan dapat digunakan untuk produksi baja tahan karat. Teknologi RKEF cenderung tidak efektif untuk bijih limonit yang mengandung besi tinggi dan nikel rendah. Inovasi dari teknologi pelindian asam tekanan tinggi (HPAL) adalah kemampuannya untuk memproses bijih limonit, yang sebelumnya hanya dianggap sebagai lapisan penutup dari bijih saprolit yang lebih kaya dan dibuang sebagai limbah. Teknologi HPAL dapat digunakan untuk memproses bijih limonit menjadi presipitat hidroksida campuran nikel dan kobalt. Presipitat hidroksida campuran ini kemudian dapat diproses lebih lanjut menjadi nikel sulfat dan kobalt sulfat, yang merupakan komponen penting dalam baterai kendaraan listrik.

Proses HPAL dalam pengolahan bijih limonit dapat diringkas dalam langkah-langkah berikut (Gultom dan Sianipar; 2020; Ribero et al., 2021):

1) Bijih limonit dicampur dengan air untuk membentuk bubur (slurry) dengan penghilangan material kasar berkadar rendah.
2) Bubur dimasukkan ke dalam autoclave dan dilindi menggunakan asam sulfat pada suhu sekitar 250°C dan tekanan hingga 5000 kiloPascal.
3) Pelindian asam memisahkan bubur menjadi larutan lindi kaya (pregnant leach solution) yang mengandung nikel dan kobalt, serta residu pelindian miskin berupa padatan, yang sebagian besar terdiri dari senyawa besi, aluminium oksida, silika, dan mineral lempung.
4) Baik larutan lindi kaya maupun residu pelindian miskin dinetralkan menggunakan batu kapur. Residu pelindian miskin ditambah produk reaksi dari pencampuran dengan batu kapur kini menjadi tailing.
5) Larutan lindi kaya mengalami beberapa tahap yang disebut *counter current decantation* (CCD) untuk menghilangkan pengotor melalui presipitasi dan meningkatkan konsentrasi nikel dan kobalt dalam larutan. Endapan pengotor juga merupakan bagian dari tailing.
6) Batu kapur tambahan ditambahkan untuk menetralkan tailing, sehingga produk reaksi meningkatkan massa tailing.
7) Pemrosesan lanjutan mengubah larutan lindi kaya menjadi presipitat hidroksida campuran nikel dan kobalt dalam bentuk padatan.
8) Pemrosesan lebih lanjut dapat mengubah presipitat hidroksida campuran menjadi produk akhir berupa nikel sulfat dan kobalt sulfat.

Alternatif pembuangan tailing (residu pelindian miskin, endapan dari pemurnian larutan lindi kaya, dan produk reaksi dari netralisasi menggunakan batu kapur) akan dibahas dalam subbagian berikutnya.

Alternatif untuk Pembuangan Tailing Tambang

Pembuangan tailing tambang yang tidak direkomendasikan adalah pembuangan tailing ke laut atau sungai. Pembuangan tailing tambang ke laut, sungai, danau, atau badan air alami lainnya tidak boleh dilakukan dalam keadaan apa pun (Morrill et al., 2022). Sangadji et al. (2019) memberikan tinjauan yang sangat baik tentang bahaya pembuangan tailing ke laut dalam konteks Indonesia dan mendokumentasikan kerusakan sebelumnya yang disebabkan oleh pembuangan tailing laut dalam di Indonesia. Menurut Sangadji et al. (2019), "Indonesia telah mengalami sendiri akibat yang mengerikan dari pembuangan tailing ke laut. Selama delapan tahun (1996–2004), PT Newmont Minahasa Raya membuang total empat juta ton tailing tambang emas pada kedalaman 82 m di Teluk Buyat. Pipa tailing tersebut berulang kali bocor, menyebabkan kerusakan pada ekosistem laut dan pesisir termasuk terumbu karang." Patut dicatat bahwa kalangan industri pertambangan pun telah mengecam pembuangan tailing ke sungai dan, setidaknya, laut dangkal. Menurut *Responsible Gold Mining Principles*, "Kami tidak akan mengembangkan tambang baru yang akan melibatkan penggunaan tailing sungai atau tailing bawah laut dangkal" (World Gold Council, 2019).

Tentu saja, praktik idealnya adalah mengkonversi tailing menjadi produk yang dapat dipasarkan, sehingga pada dasarnya tidak ada tailing (yang secara definisi adalah produk limbah). Hambatan utamanya adalah tailing tidak dapat menjadi produk yang dapat dipasarkan kecuali jika tailing tersebut tidak beracun, tidak melepaskan logam, dan tidak menghasilkan asam. Konsep-konsep tersebut akan dibahas lebih lanjut dalam subbagian "Air Asam Tambang

dan Pelepasan Logam." Hambatan sekundernya adalah bahwa, bahkan ketika tailing telah terbukti tidak berbahaya bagi lingkungan, produk yang diusulkan sebagian besar merupakan produk bernilai rendah, seperti agregat jalan dan pupuk. Oleh karena itu, tailing hanya dapat dijual sebagai agregat jalan atau pupuk jika ada pasar terdekat, sehingga biaya pengiriman dapat ditekan hingga minimal.

Alternatif ideal kedua adalah mengembalikan tailing ke dalam lubang tambang yang telah habis diambil bijihnya. Pembuangan tailing semacam ini dianggap sebagai praktik terbaik dalam hampir semua keadaan, kecuali dalam kasus di mana pengisian kembali justru menimbulkan risiko kontaminasi air tanah yang lebih besar dibandingkan pembangunan fasilitas penyimpanan tailing di atas permukaan. Keadaan semacam ini mungkin terjadi, misalnya, jika lubang bekas tambang terdapat retakan atau permeabel, sementara tailing dapat dipindahkan ke lokasi lain di atas fondasi yang tidak tembus air. Namun, pada sebagian besar kasus hanya sebagian kecil dari tailing yang dapat dikembalikan ke dalam lubang bekas tambang. Faktor terpenting yang membatasi fraksi tailing yang dapat dikembalikan adalah ekspansi (juga disebut pembesaran) yang terjadi selama seluruh proses konversi suatu badan bijih menjadi komoditas bernilai (seperti presipitat hidroksida campuran nikel dan kobalt) dan tailing. Dalam kasus proyek HPAL, proses-proses ini mencakup peledakan, penghancuran (juga disebut kominusi), dan pencampuran dengan air. Penambahan reagen untuk menetralkan keasaman juga menciptakan produk reaksi padat yang meningkatkan volume dan massa tailing secara keseluruhan.

Secara ringkas, penyimpanan tailing secara permanen di atas permukaan tanah sering kali merupakan satu-satunya alternatif yang dapat dijalankan saat ini (lihat Gambar 7). Meskipun sering kali merupakan satu-satunya alternatif yang dapat dijalankan, fasilitas penyimpanan tailing di atas permukaan tanah menciptakan ancaman permanen berupa kemungkinan runtuhnya fasilitas secara katastrofik, serta kontaminasi air tanah dan air permukaan oleh tailing. Tailing biasanya dialirkan secara hidrolik di belakang bendungan yang dibangun dari batuan limbah, fraksi kasar tailing setelah pemadatan yang sesuai, atau urugan tanah/urugan batu yang tersedia di lokasi tambang (lihat Gambar 8a-b). Tailing dapat dibagi menjadi dua ukuran dengan sifat fisik yang sangat berbeda, yaitu tailing kasar atau pasir (lebih besar dari 0,075 mm) dan tailing halus atau lumpur (lebih kecil dari 0,075 mm). Pengaliran hidrolik menyebabkan pemisahan ukuran tailing secara gravitasi. Pasir yang lebih besar mengendap lebih dekat ke bendungan membentuk pantai. Lumpur yang lebih halus dan air mengalir lebih jauh dari bendungan membentuk kolam pengendapan di mana lumpur perlahan mengendap dari suspensi. Biasanya, air diambil kembali dari kolam pengendapan dan dipompa kembali ke operasi pertambangan. Pengaliran hidrolik berarti tailing terlalu basah untuk dipadatkan di fasilitas penyimpanan tailing, dan implikasinya akan dibahas dalam subbagian berikutnya mengenai "Likuifaksi."

Gambar 7. Dalam manajemen tailing konvensional, tailing basah disimpan secara permanen di belakang bendungan yang dibangun dari batuan limbah, fraksi kasar dari tailing, atau isian batu atau tanah yang tersedia di lokasi tambang. Foto Bendungan Aguzadera di tambang Atalaya Mining Riotinto di Andalusia, Spanyol, diambil oleh penulis pada 19 Juni

Gambar 8a. Campuran air dan tailing dengan kandungan padatan sebesar 35% berdasarkan massa dialirkan secara hidrolik ke kolam tailing dari puncak Bendungan Cobre di tambang Riotinto milik Atalaya Mining di Andalusia, Spanyol (lihat Gambar 7). Karena tidak adanya pemadatan, tailing yang terhampar secara longgar ini rentan terhadap likuifaksi (lihat Gambar 10). Foto diambil oleh penulis pada 21 Juni 2019.

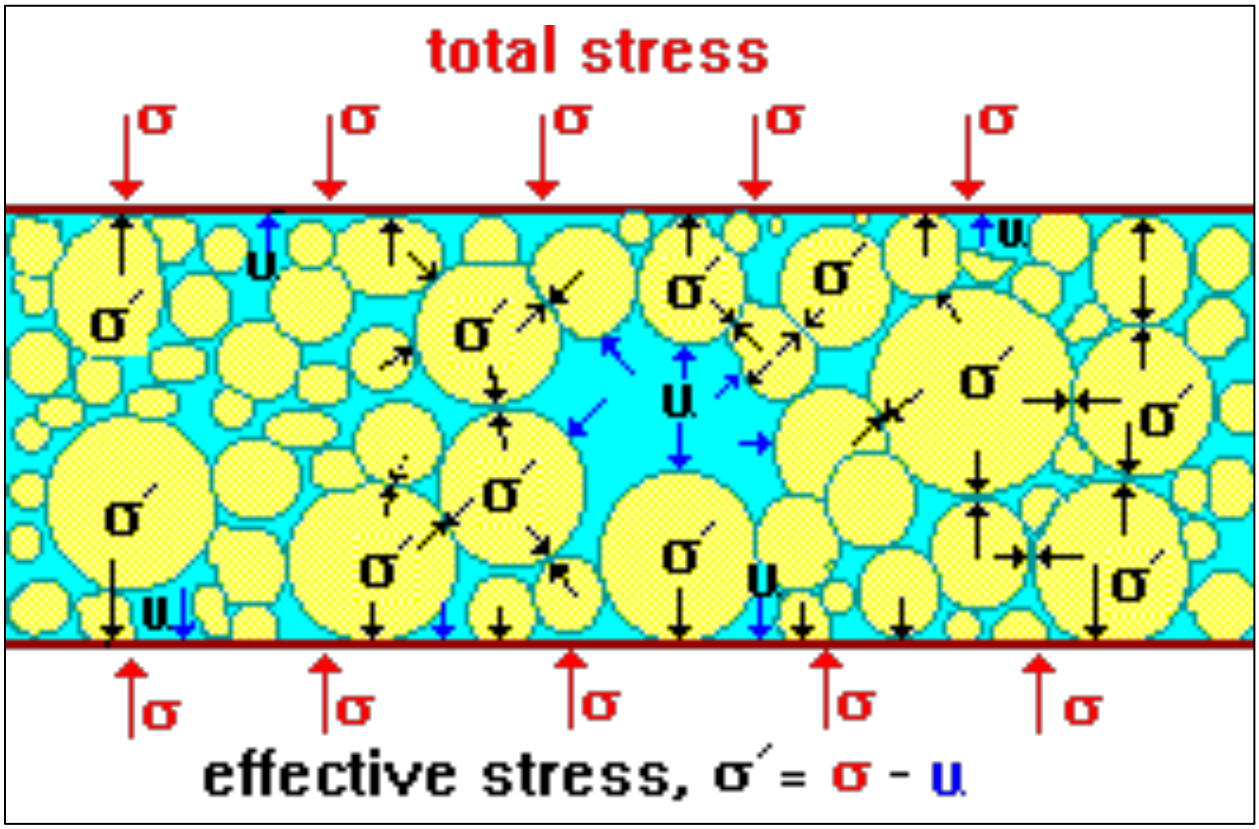
Gambar 8b. Campuran air dan tailing dengan kandungan padatan sebesar 35% berdasarkan massa dibuang secara hidrolik ke kolam tailing dari puncak bendungan Cobre di tambang Atalaya Mining Riotinto di Andalusia, Spanyol (lihat Gambar 7). Karena tidak adanya pemadatan, tailing yang terkemas longgar ini rentan terhadap likuifaksi (lihat Gambar 10). Foto diambil oleh penulis pada 21 Juni 2019.

Dalam pengelolaan tailing konvensional**,** tailing dikirim ke fasilitas penyimpanan tailing langsung dari pabrik pengolahan bijih tanpa proses pengeringan, sehingga kadar air geoteknis tailing berada dalam kisaran 150–400%, meskipun bisa serendah 67%. Teknologi tailing pekat berdensitas tinggi atau pasta (*high-density thickened* atau *paste tailings*) mengurangi kadar air tailing hingga kisaran 33–67% sebelum dikirim ke fasilitas penyimpanan tailing, sedangkan teknologi tailing yang difilter (*filtered tailings*) menurunkan kadar air geoteknis tailing hingga kurang dari sekitar 20%. Tailing konvensional berperilaku seperti lumpur cair, sementara tailing berdensitas tinggi atau pasta berperilaku seperti pasta (sesuai namanya), dan tailing yang difilter berperilaku seperti tanah lembab. Batas antara berbagai teknologi tailing ini bergantung pada sifat fisik dan kimia tailing, dan didefinisikan berdasarkan perilaku fisiknya, bukan kadar air geoteknisnya (Klohn Crippen Berger, 2017). Keunggulan dan risiko teknologi tailing yang difilter akan dibahas setelah pembahasan mengenai likuifaksi.

Likuifaksi

Sebongkah tailing tambang terdiri dari partikel batuan padat di mana pori-pori di antara partikel tersebut terisi oleh campuran udara dan air. Dari sudut pandang rekayasa, massa tailing tambang adalah sejenis tanah. Tentu saja, dari perspektif pertanian, tanah seharusnya mengandung bahan organik dan organisme serta mampu mendukung pertumbuhan tanaman tingkat tinggi. Namun, sifat biologis ini tidak relevan untuk tujuan rekayasa. Referensi yang sangat baik untuk informasi lebih lengkap tentang sifat teknik tanah adalah Holtz et al. (2011). Istilah "tanah" dan "massa tailing" akan digunakan secara bergantian dalam subbagian ini, yang sebagian besar mengikuti presentasi dalam Holtz et al. (2011).

Tegangan normal berarti tegangan apa pun yang bekerja tegak lurus terhadap suatu permukaan (lihat Gambar 9). Tegangan normal yang bekerja pada suatu tanah dapat sebagian dikompensasi oleh tekanan air dalam pori-pori. Tegangan efektif didefinisikan sebagai tegangan normal dikurangi tekanan air pori. Tegangan efektif adalah ukuran sejauh mana partikel padat saling berinteraksi atau "bersentuhan" satu sama lain (lihat Gambar 9). Tegangan normal tanpa mengurangkan tekanan air pori juga disebut tegangan total.

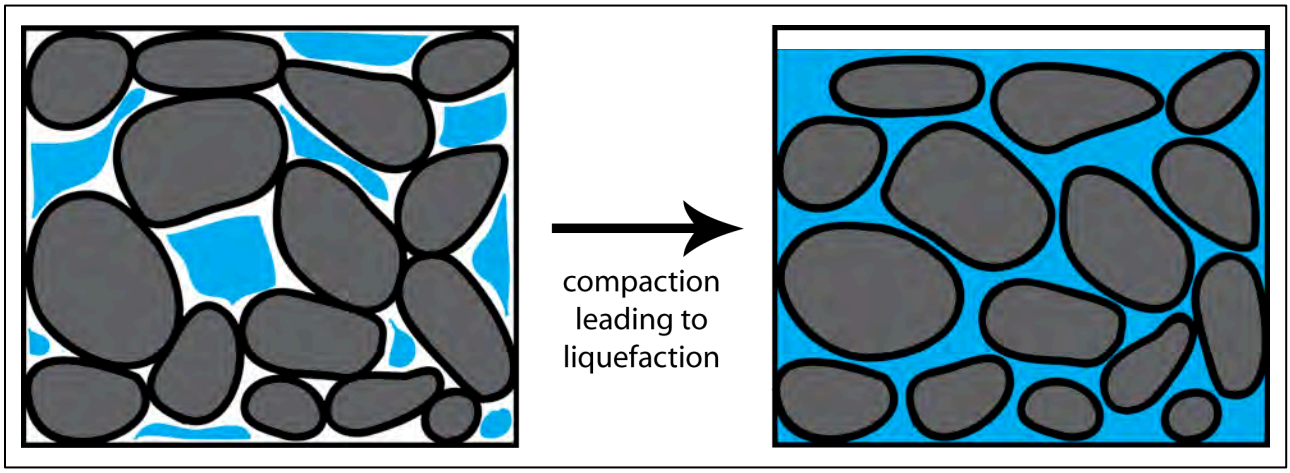


Gambar 9. Tegangan efektif dalam tanah adalah sama dengan tegangan total dikurangi tekanan air pori. Tegangan efektif merupakan ukuran sejauh mana partikel padat saling berinteraksi atau “bersentuhan” satu sama lain. Prinsip Terzaghi menyatakan bahwa respons massa tanah terhadap perubahan tegangan semata-mata disebabkan oleh perubahan tegangan efektif. Gambar diambil dari GeotechniCAL (2025).

Prinsip Terzaghi menyatakan bahwa respons suatu massa tanah terhadap perubahan tegangan semata-mata disebabkan oleh perubahan tegangan efektif (Holtz et al., 2011). Sebagai

contoh, misalkan sedimen diendapkan di dataran banjir sungai atau tailing dibuang secara hidrolik ke dalam reservoir tailing tanpa pemadatan. Berat partikel padat menciptakan tegangan normal, sehingga partikel akan mengalami konsolidasi di bawah beratnya sendiri. Besarnya dan laju konsolidasi ditentukan oleh tegangan efektif, yaitu sejauh mana partikel-partikel tersebut saling berinteraksi. Tekanan air yang cukup dapat mengimbangi tegangan normal, sehingga hanya sedikit konsolidasi yang terjadi dan dengan laju yang lambat.

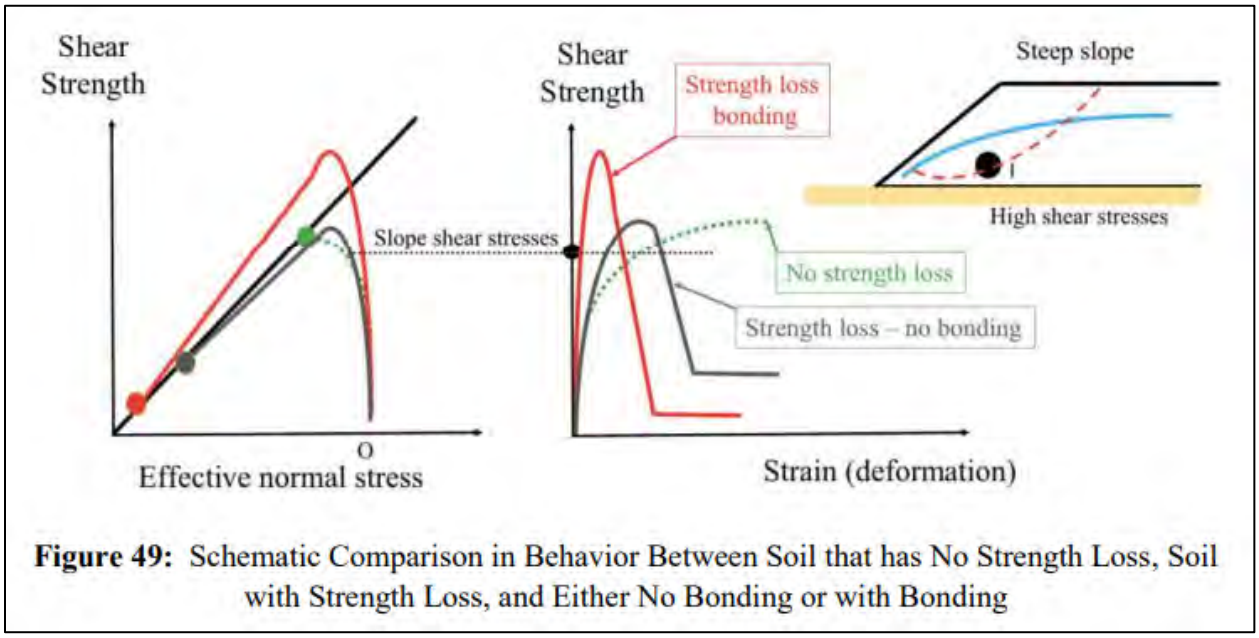
Fenomena likuifaksi, di mana tanah kehilangan kekuatannya dan berperilaku seperti cairan, dapat dijelaskan melalui penerapan Prinsip Terzaghi (lihat Gambar 10). Dalam diagram di sisi kiri Gambar 10, meskipun partikel padat terkemas longgar dan pori-porinya jenuh air, partikel-partikel tersebut saling bersentuhan. Karena ada kontak antar partikel, beban (berat partikel atau material lain di atas partikel seperti yang ditunjukkan pada sisi kiri Gambar 10), ditanggung oleh partikel padat. Beban juga sebagian ditanggung oleh air karena adanya tekanan air. Istilah permeabilitas mengacu pada kemampuan air untuk mengalir melalui pori-pori. Campuran partikel kasar dan halus akan memiliki permeabilitas rendah karena partikel-partikel halus akan mengisi pori-pori di antara partikel kasar dan dengan demikian membatasi ruang pori untuk aliran air.



Gambar 10. Pada diagram di sebelah kiri, meskipun partikel padat tersusun longgar dan pori-porinya jenuh air, partikel-partikel tersebut saling bersentuhan sehingga beban didukung oleh partikel (dan sebagian oleh air). Susunan longgar menunjukkan bahwa tanah berada dalam kondisi kontraktif, sehingga partikel padat cenderung memadat menjadi susunan yang lebih rapat setelah terjadi peningkatan beban atau gangguan (seperti gempa bumi). Jika air tidak dapat keluar (karena permeabilitas rendah atau gangguan yang terlalu cepat), maka partikel padat tidak dapat memadat, sehingga tegangan tambahan akan berubah menjadi peningkatan tekanan air pori (lihat diagram di sebelah kanan). Peningkatan tekanan air ini dapat menurunkan tegangan efektif hingga mendekati nol atau ke titik di mana partikel-partikel tidak lagi "bersentuhan" (lihat Gambar 9). Pada titik ini, massa tanah mengalami likuifaksi, di mana air mendukung seluruh beban dan massa partikel serta air berperilaku seperti cairan. Fenomena likuifaksi ini diperkuat oleh kondisi pori yang jenuh dan susunan partikel yang longgar. Endapan tailing sangat rentan terhadap likuifaksi karena tailing sangat longgar akibat pembuangan secara hidrolik ke dalam kolam tanpa pemadatan. Jika pori-pori belum jenuh sebelum gangguan terjadi, maka sebagian pemadatan dapat terjadi (mengurangi ukuran pori), sehingga pori menjadi jenuh. Setiap perilaku kontraktif selanjutnya akan mengubah tegangan tambahan menjadi peningkatan tekanan air pori. Berdasarkan hal tersebut, likuifaksi tetap dimungkinkan bahkan jika pori-pori hanya 80% jenuh. Gambar diambil dari DoITPoMS (2025).

Kondisi kemasan longgar berarti bahwa tanah berada dalam keadaan kontraktif (atau kontraktil), sehingga partikel padat akan cenderung memadat ke keadaan yang lebih rapat setelah

terjadi peningkatan beban atau gangguan (seperti gempa bumi). Jika air tidak dapat keluar (karena permeabilitas rendah atau kecepatan gangguan yang tinggi), partikel padat tidak dapat memadat sehingga tegangan tambahan akan dikonversi menjadi peningkatan tekanan air pori (lihat sisi kanan Gambar 10). Peningkatan tekanan air ini dapat mengurangi tegangan efektif hampir menjadi nol atau hingga titik di mana partikel-partikel tersebut tidak lagi "bersentuhan" satu sama lain (lihat Gambar 10). Pada titik ini, massa tanah telah mengalami likuifaksi di mana air menanggung seluruh beban dan massa partikel serta air berperilaku seperti cairan. Cara lain untuk menjelaskan konsep yang sama adalah bahwa likuifaksi adalah fenomena di mana campuran partikel padat dan air mengalami penurunan cepat dan drastis dalam kekuatan geser dari kekuatan puncak (juga disebut kekuatan luluh) ke kekuatan sisa (juga disebut kekuatan setelah likuifaksi atau kekuatan pasca likuifaksi) (lihat Gambar 11). Penurunan kekuatan geser hingga nol hanya bersifat sementara karena begitu campuran partikel padat dan air mulai mengalir, akan ada interaksi antar partikel yang memberikan sedikit kekuatan geser pada campuran tersebut.



Gambar 11. Ketika tanah mengalami likuifaksi, terjadi penurunan tajam pada kekuatan geser dari kekuatan puncak (juga disebut kekuatan luluh) ke kekuatan sisa (juga disebut kekuatan setelah likuifaksi atau kekuatan pasca-likuifaksi). Kekuatan geser tidak benar-benar turun menjadi nol (bandingkan dengan Gambar 10) karena, setelah tanah mulai mengalir, masih ada interaksi antar partikel padat yang memberikan sedikit kekuatan geser pada campuran air dan partikel padat. Gambar diambil dari Robertson et al. (2019).

Fenomena likuifaksi dipicu oleh pori-pori yang jenuh dan partikel-partikel yang terkemas longgar. Fasilitas penyimpanan tailing konvensional sangat rentan terhadap likuifaksi karena tailing sangat longgar akibat dibuang secara hidrolik ke fasilitas penyimpanan tanpa pemadatan. Jika pori-pori tidak jenuh sebelum gangguan terjadi, maka beberapa pemadatan dapat terjadi (mengurangi ukuran pori), sehingga pori-pori menjadi jenuh. Setiap perilaku kontraktif selanjutnya akan mengubah tegangan tambahan menjadi peningkatan tekanan air pori. Berdasarkan hal tersebut, likuifaksi dapat terjadi bahkan jika pori-pori hanya jenuh 80%.

Terdapat banyak literatur mengenai metode evaluasi kerentanan tanah atau tailing terhadap likuifaksi (Fell et al., 2015). Misalnya, pemisahan gravitasi yang tidak sempurna selama pembuangan hidrolik dapat menyebabkan campuran tailing kasar dan halus, yang dapat membuat tailing lebih rentan terhadap likuifaksi karena menurunkan permeabilitasnya. Berdasarkan hal itu, distribusi ukuran partikel dapat digunakan sebagai alat penyaringan awal untuk menilai potensi likuifaksi. Alat penyaringan yang lebih canggih (Seed et al. 2003; Bray et al., 2004) mencakup hubungan empiris antara indeks plastisitas dan batas cair atau rasio kadar air geoteknik terhadap batas cair. Batas cair adalah kadar air geoteknik di atas mana campuran air dan partikel padat berperilaku seperti cairan, sedangkan batas plastis adalah kadar air geoteknik di atas mana campuran berperilaku seperti plastis. Indeks plastisitas adalah selisih antara batas cair dan batas plastis, yang keduanya dinyatakan dalam persentase.

Tanah yang sudah dalam keadaan terkemas rapat dikatakan berada dalam keadaan dilatif (atau dilatan), sehingga partikel padat akan cenderung mengembang setelah mengalami gangguan. Dalam kasus ini, gangguan menyebabkan penguatan, bukan pelemahan tanah, karena penurunan tekanan air pori yang dihasilkan. Tanah di mana partikel-partikelnya tidak akan memadat maupun mengembang setelah gangguan dikatakan berada dalam keadaan kritis. Dasar dari Mekanika Tanah Keadaan Kritis adalah prinsip bahwa, setelah terjadi gangguan, semua tanah akan cenderung mendekati keadaan kritis dalam pengemasan, di mana rasio pori kritis (rasio volume ruang pori terhadap volume partikel padat) bergantung pada tegangan vertikal efektif.

Teknologi Limbah Tailing yang Difilter

Penerapan teknologi tailing yang difilter bertujuan mengatasi dua permasalahan utama dalam pertambangan dengan melakukan pengeringan parsial pada tailing sebelum dikirim ke fasilitas penyimpanan tailing:

1) Konsumsi air dapat dikurangi melalui daur ulang air dari tailing kembali ke operasi pertambangan.
2) Kemungkinan terjadinya likuifaksi pada tailing dapat dikurangi dengan menjenuhkan tailing dan kemudian memadatkannya saat disimpan di fasilitas penyimpanan tailing yang difilter.

Keunggulan lain dari teknologi tailing yang difilter antara lain mengurangi dampak jika fasilitas penyimpanan tailing gagal, memperkecil jejak lahan fasilitas penyimpanan tailing, dan mempermudah penutupan fasilitas secara aman (Klohn Crippen Berger, 2017).

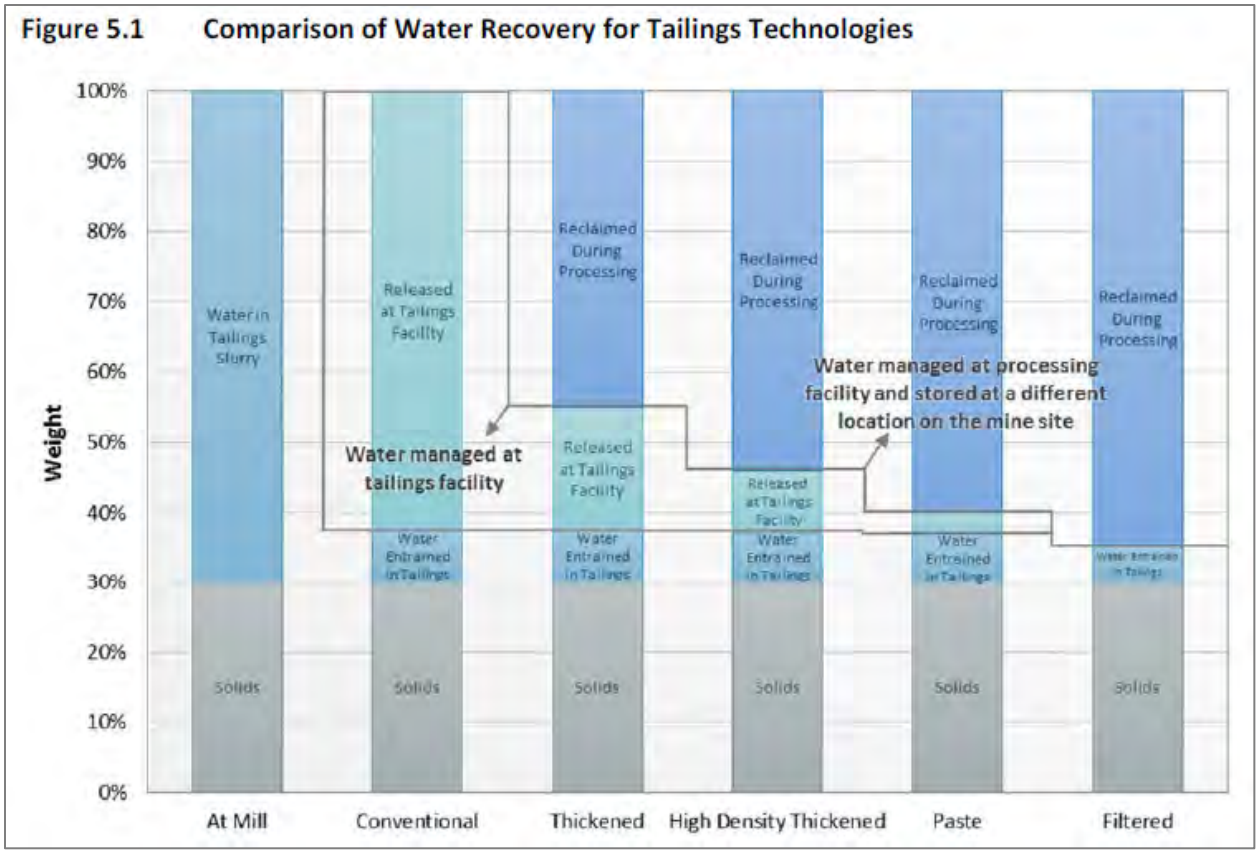
Meskipun literatur mengenai proyek HPAL di Indonesia berulang kali merujuk pada istilah “dry tailings,” “dry stacking,” dan “dry stack tailings facilities,” istilah-istilah ini bersifat non-standar dan sebaiknya dihindari. Tailing tersebut tidak benar-benar kering dan, jika memang kering, maka tidak mungkin dipadatkan dengan baik untuk penyimpanan yang aman. Di situs web mereka, perusahaan konsultan Knight-Piésold memuat publikasi dari para pegawainya yang menyatakan, “Mengenai terminologi, istilah ‘dry stack’ yang agak menyesatkan umumnya bukanlah istilah teknik yang baik karena kadar air yang ditargetkan dari pabrik filter biasanya diharapkan mendekati kadar air optimum berdasarkan prosedur pemadatan Proctor … Para insinyur geoteknik mengasosiasikan kadar air optimum dengan tingkat kelembaban yang sedikit di bawah kejenuhan penuh setelah pemadatan, sehingga menyebut fasilitas semacam itu sebagai ‘dry stack’ merupakan kekeliruan. Para penulis saat ini mendorong praktisi untuk meninggalkan penggunaan istilah ‘dry stacking’ dan menggantinya dengan istilah yang lebih lugas, yaitu

‘filtered tailings.’ Tidak diinginkan untuk secara tidak sengaja menyesatkan publik luas dengan istilah industri yang jelas-jelas disalahgunakan” (Ulrich dan Coffin, 2017). Terkait dengan tambang Twin Metals yang diusulkan di Minnesota (AS)—yang izin mineralnya kini telah dibatalkan—Departemen Sumber Daya Alam Minnesota (2021) mempertanyakan, “Apakah menyebut kue filter tailing sebagai ‘kering’ merupakan terminologi umum untuk produk dengan kadar air 13% hingga 16%?” Buku pegangan SME (Society for Mining, Metallurgy and Exploration) *Tailings Management Handbook* menegaskan bahwa “Istilah ‘dry stacking’ ... agak keliru. Tailing yang ditumpuk harus cukup kering agar dapat ditempatkan dalam tumpukan yang stabil dan dapat dilalui, namun tidak terlalu kering hingga menghasilkan debu akibat tiupan angin” (Reemeyer, 2022).

Kritik terhadap istilah seperti “dry stack” paling komprehensif disampaikan dalam dokumen panduan *Tailings Dam Safety Best Practices* (FEMA, 2025). Menurut FEMA (2025), “Meskipun sering kali secara keliru disebut sebagai ‘dry stack,’ tailing yang difilter biasanya masih mengandung sejumlah besar air yang dapat merembes keluar seiring waktu saat tinggi tumpukan dan tegangan efektif meningkat. Jika tidak dikelola dengan baik, termasuk pengendalian air permukaan, bagian bawah tumpukan tailing yang difilter dapat menjadi jenuh (atau hampir jenuh), dan jika kue filter lembab tidak dipadatkan hingga densitas yang cukup tinggi, maka material tersebut dapat mengalami likuifaksi dan kegagalan aliran … Selain itu, sebagian besar (jika bukan semua) fasilitas tailing yang difilter yang ada telah mengalami kesulitan mencapai kadar air target pada suatu waktu selama operasinya.” Dalam laporan ini, istilah yang akan digunakan untuk tailing adalah “difilter” bukan “kering,” kecuali jika mengutip dari sumber lain atau merujuk pada nama resmi.

Perbandingan sederhana terkait kadar air dalam berbagai kategori tailing (konvensional, dipadatkan, dipadatkan berdensitas tinggi atau pasta, difilter) cenderung melebih-lebihkan pengurangan konsumsi air yang dapat dicapai dengan melakukan transisi dari teknologi tailing konvensional ke teknologi tailing yang difilter. Alasannya adalah bahwa dalam fasilitas penyimpanan tailing, tailing padat akan mengendap dari suspensi sehingga air limpas (supernatan) dapat didaur ulang kembali ke operasi pertambangan. Misalnya, sebuah pabrik pengolahan umumnya mengekspor 70 ton air untuk setiap 30 ton tailing padat ke fasilitas penyimpanan tailing (lihat Gambar 12). Dalam fasilitas tailing konvensional yang khas, dari 70 ton air tersebut, 7 ton akan tetap terjebak dalam tailing dengan kadar air geoteknis sebesar 23,3%, sementara 63 ton air akan dilepaskan di fasilitas tailing dan didaur ulang kembali ke operasi pertambangan (lihat Gambar 12). Transisi dari tailing konvensional ke tailing yang dipadatkan, kemudian ke tailing pasta berdensitas tinggi, meningkatkan proporsi air yang didaur ulang melalui pengeringan tailing sebelum pengiriman ke fasilitas penyimpanan (“didaur ulang saat pengolahan”), dan mengurangi proporsi air yang didaur ulang dari fasilitas penyimpanan tailing (“dilepaskan di fasilitas tailing”) (lihat Gambar 12). Namun, dari sisi konsumsi air, hasil akhirnya tetap sama, yaitu bahwa secara umum, untuk setiap 30 ton tailing padat, sebanyak 7 ton air akan tetap terjebak secara permanen dalam tailing (lihat Gambar 12). Perubahan besar terjadi pada transisi ke teknologi tailing yang difilter, di mana pada umumnya, tidak ada air yang dapat didaur ulang dari fasilitas tailing yang difilter, sementara 5 ton air tetap terjebak dalam setiap 30 ton tailing padat, yang menghasilkan kadar air geoteknis sebesar 16,7% (lihat Gambar 12). Singkatnya, pengurangan konsumsi air yang dapat dicapai melalui penggunaan teknologi tailing yang difilter adalah sebesar 2 ton air untuk setiap 30 ton tailing padat, jika dibandingkan dengan teknologi pengelolaan tailing lainnya (Klohn Crippen Berger, 2017).

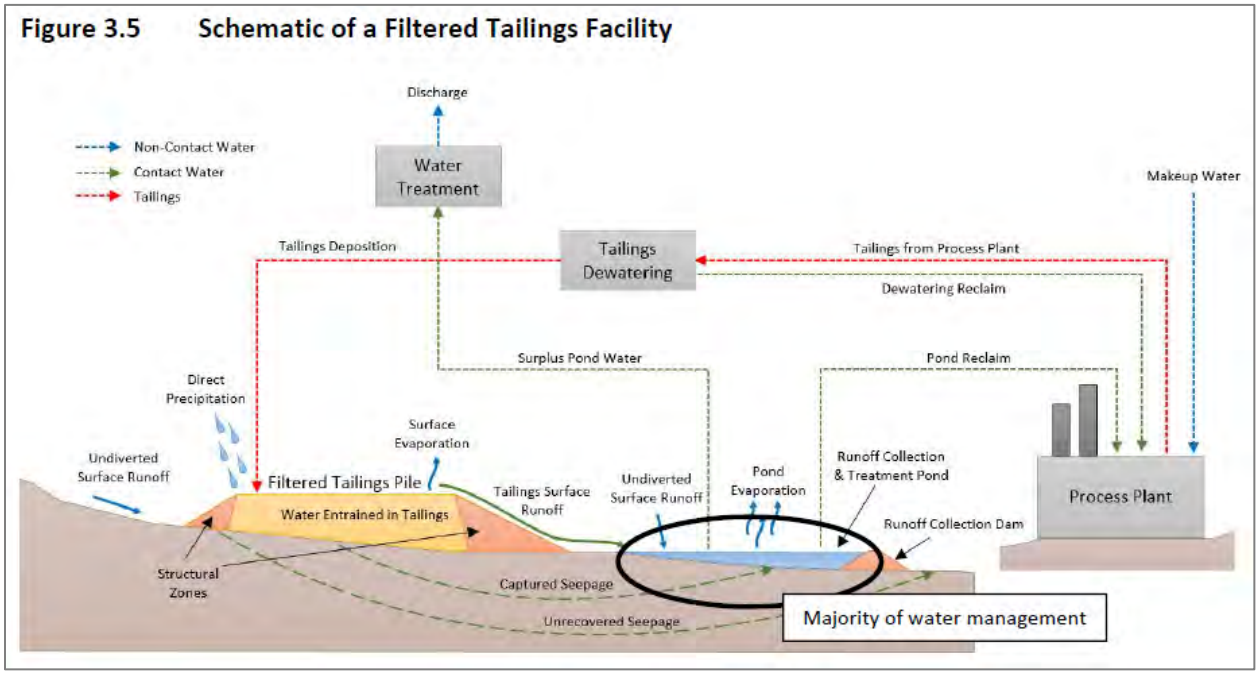
Sumber tambahan terkait penurunan konsumsi air melalui teknologi tailing yang difilter adalah berkurangnya evaporasi karena tidak adanya permukaan air bebas di atas tailing. Penguapan dari kolam tailing sangat bervariasi dan bergantung pada radiasi matahari, suhu air, dan faktor atmosfer seperti suhu udara, kelembaban relatif, dan kecepatan angin, serta teknologi yang dapat digunakan untuk mengurangi penguapan. Menurut Spiller dan Dunne (2017), "Jumlah air yang menguap dari fasilitas penyimpanan tailing (TSF) dapat berkisar dari sekitar 5% hingga lebih dari 60% dari total kehilangan air di TSF." Berdasarkan itu, pada kisaran evaporasi yang rendah (5% dari total kehilangan air), untuk setiap 7 ton air yang terjebak dalam tailing, sebanyak 0,4 ton air tambahan akan hilang karena penguapan. Pada kisaran evaporasi yang tinggi (60% dari total kehilangan air), untuk setiap 7 ton air yang terjebak dalam tailing, sebanyak 10,5 ton air tambahan akan hilang karena penguapan. Dengan demikian, pengurangan konsumsi air melalui konversi ke teknologi tailing yang difilter dapat mencapai hingga 12,5 ton air untuk setiap 30 ton tailing jika konversi dilakukan dari fasilitas yang ada atau yang direncanakan dengan tingkat evaporasi yang sangat tinggi dan tanpa teknologi pengurang evaporasi lainnya. Di sisi lain, kolam tailing juga dapat menjadi sumber air melalui penangkapan curah hujan dan limpasan permukaan (Klohn Crippen Berger, 2017). Sebagian besar studi kasus mengenai konversi ke teknologi tailing yang difilter belum secara eksplisit memperhitungkan pengurangan konsumsi air akibat berkurangnya penguapan dari kolam tailing (misalnya, Gagnon dan Lind, 2017; Moreno et al., 2018).



Gambar 12. Dalam teknologi tailing konvensional, ketika dilakukan pemadatan, pemadatan dengan densitas tinggi, ataupun menjadikan pasta, untuk setiap 30 ton tailing padat, maka air yang terjebak dalam tailing memiliki massa sebesar 7 ton. Air yang terjebak ini tidak dilepaskan saat tailing mengendap dari suspensi dan umumnya tidak dapat dipulihkan, sehingga menjadi bagian dari konsumsi air. Dalam teknologi tailing yang difilter, untuk setiap 30 ton tailing padat, air yang tidak dapat dipulihkan dan terjebak dalam tailing memiliki massa sebesar 5 ton. Oleh karena itu, pengurangan konsumsi air yang dihasilkan dari penggunaan teknologi tailing yang difilter adalah sebesar 2 ton air untuk setiap 30 ton tailing. Pengurangan tambahan dalam konsumsi air juga dapat terjadi melalui pengurangan evaporasi di fasilitas penyimpanan tailing. Gambar diambil dari Klohn Crippen Berger (2017).

Teknologi tailing yang difilter mengurangi kemungkinan terjadinya likuifaksi pada timbunan tailing dengan cara menjenuhkan ruang pori di antara tailing, mengurangi jumlah total air di dalam fasilitas penyimpanan tailing, serta memadatkan tailing di dalam fasilitas tersebut. Pemadatan ini mengurangi kemungkinan likuifaksi dengan menempatkan tailing dalam kondisi dilatif (berlawanan dengan kontraktif), di mana tailing akan mengembang, bukan memadat, saat mengalami geseran atau gangguan. Secara umum, fasilitas penyimpanan tailing yang difilter dibangun dengan lapisan luar yang terdiri dari tailing yang dipadatkan (kadang disebut "zona struktural") yang mengelilingi inti dalam yang berisi tailing yang tidak dipadatkan atau hanya dipadatkan ringan (lihat Gambar 13). Meskipun beberapa rencana proyek pertambangan terbaru mengklaim bahwa tailing yang difilter tidak memerlukan bendungan, zona struktural tersebut sebenarnya menjalankan fungsi yang sama persis seperti bendungan, yaitu sebagai struktur rekayasa yang mencegah aliran air atau material limbah yang mengandung air. Sebagai contoh, dalam usulan tambang tembaga di Minnesota, Twin Metals Minnesota (2022) menyatakan, "Dry stacking filtered tailings berarti tidak diperlukan bendungan – kegagalan bendungan menjadi mustahil." Tanggapan dari Departemen Sumber Daya Alam Minnesota (2021) adalah bahwa

bendungan adalah "struktur yang menahan air **dan/atau material limbah yang mengandung air**" (penekanan dalam teks asli). Klohn Crippen Berger (2017) juga menegaskan bahwa fasilitas tailing yang difilter "tetap memerlukan 'zona struktural' (yang berfungsi seperti bendungan), yang terbuat dari tailing yang dipadatkan untuk tujuan penahanan" dan "jika tailing yang difilter ditempatkan dalam fasilitas mandiri (tumpukan), maka lereng luarnya harus mempertahankan stabilitas struktural (mirip dengan bendungan atau timbunan limbah), terutama di bawah kondisi beban seismik." Akhirnya, menurut *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management*, "Karena fasilitas tailing yang difilter tetap memerlukan zona struktural (yang merupakan jenis bendungan) untuk penahanan, maka fasilitas tersebut harus diperlakukan sebagai fasilitas tailing rekayasa (yaitu bendungan tailing) dari sudut pandang regulasi … Zona struktural dari fasilitas tailing yang difilter menjalankan fungsi yang sama seperti bendungan" (Morrill et al., 2022).



Gambar 13. Teknologi filter press saat ini belum secara konsisten menghasilkan tailing yang difilter dengan kadar air geoteknis yang sesuai untuk pemadatan yang memadai. Bahkan jika tailing keluar dari filter press dengan kadar air yang tepat, tailing tersebut masih dapat menjadi basah kembali akibat curah hujan. Solusi standar untuk timbunan tailing yang difilter adalah dengan menempatkan tailing yang terlalu basah atau terlalu kering untuk dipadatkan dengan baik di bagian tengah fasilitas dalam zona non-struktural, di mana tailing tidak dipadatkan atau hanya dipadatkan secara ringan. Tailing dengan kadar air yang sesuai untuk pemadatan yang memadai kemudian ditempatkan di bagian tepi luar, di mana tailing dapat dipadatkan untuk membentuk zona struktural. Zona struktural ini berfungsi sama seperti bendungan bagi zona non-struktural. Gambar diambil dari Klohn Crippen Berger (2017).

Tailings Dam Safety Best Practices menekankan bahwa status zona struktural sebagai bendungan bergantung pada potensi likuifaksi dari tailing yang difilter. Menurut *Tailings Dam Safety Best Practices*, "Bendungan didefinisikan dalam dokumen ini sebagai struktur buatan yang menahan isi yang berpotensi mengalir. Isi tersebut dapat berada dalam fase cair, semi-padat, atau padat, tetapi berpotensi mengalami likuifaksi (yaitu, dapat kembali menjadi fase cair) di bawah kondisi beban tertentu. Oleh karena itu, panduan ini dapat diterapkan pada fasilitas

tailing yang difilter jika tailing tersebut memiliki potensi untuk mengalir" (FEMA, 2025). Dokumen dari FEMA (2025) juga menyatakan, "Penahanan umumnya dicapai dengan menggunakan zona struktural luar dari material galian setempat, batuan limbah, atau tailing yang difilter dan dipadatkan (jika pengeringan yang memadai tercapai) … Fasilitas tailing yang difilter dapat mencakup struktur penahan yang memenuhi definisi bendungan … Adanya struktur penahan adalah komponen penting untuk dipertimbangkan jika tailing memiliki potensi untuk menunjukkan likuifaksi aliran akibat kadar air/*moisture content* yang tinggi/tingkat kejenuhan yang tinggi karena kondisi cuaca basah atau pengeringan yang tidak memadai dari proses filtrasi, dan/atau jika tingkat pemadatan kurang dari yang dibutuhkan untuk menghilangkan perilaku kontraktif di zona struktural dari timbunan tailing."

Tujuan utama dari fasilitas penyimpanan tailing yang difilter pada dasarnya adalah untuk menyimpan tailing yang keluar dari filter press dengan kadar air terlalu tinggi untuk dapat dipadatkan secara memadai. Crystal et al. (2018) menekankan bahwa target kadar air untuk tailing yang difilter jarang tercapai. Menurut Crystal et al. (2018), "Sering kali, proyek menetapkan (atau menjanjikan) kadar kelembaban kue filter pada batas kemampuan filter (termasuk batas kemampuan thickener untuk memberikan umpan dengan rasio padatan yang diperlukan). Dalam banyak kasus, hal ini telah menyebabkan kinerja operasional tidak secara konsisten memenuhi target … Pada dasarnya, terlepas dari lokasi, jenis badan bijih, atau produsen filter press, kadar air 15% tetap menjadi target umum, sementara pemantauan kadar kelembaban kue filter dari hari ke hari menunjukkan bahwa kadar kelembaban yang dapat dicapai sering kali berada dalam kisaran 17 hingga 18% saat operasi berjalan lancar, dan dapat mencapai 20 hingga 23% saat di luar spesifikasi … 'Target' mungkin disebutkan atau dijanjikan, tetapi kadar kelembapan yang dapat dicapai pada kue filter serta variabilitas prosesnya umumnya berada di luar kendali insinyur tailing." Sebagai contoh, tambang emas dan perak di Meksiko yang menggunakan teknologi tailing difilter telah mencapai kadar air geoteknis dalam kisaran 14–19% (Espinosa-Gomez et al., 2018). Cacciuttolo Vargas dan Pérez Campomanes (2022) mencatat 28 fasilitas penyimpanan tailing yang difilter dengan kadar air geoteknis antara 12 hingga 20%, meskipun tidak dijelaskan apakah angka-angka ini merupakan target atau hasil aktual. Bahkan jika tailing keluar dari filter press dengan kadar air geoteknis yang ditargetkan, tailing masih dapat kembali basah karena curah hujan. Hingga saat ini, fasilitas penyimpanan tailing yang difilter umumnya masih berukuran kecil dan sebagian besar dibangun di wilayah beriklim kering (Klohn Crippen Berger, 2017). Pembatasan parsial pada wilayah kering ini sebagian didorong oleh kebutuhan yang lebih besar untuk mendaur ulang air di wilayah yang mengalami kelangkaan air. Namun, faktor lain adalah tantangan dalam mencapai kadar air yang sesuai untuk pemadatan yang memadai di iklim basah. Saat ini, solusi standar di wilayah kering maupun basah adalah menyediakan inti bagian dalam (daerah yang jauh dari lereng luar) untuk penempatan tailing yang tidak dapat dipadatkan dengan memadai. Crystal et al. (2018) melanjutkan, "Insinyur tailing dapat, bagaimanapun, menetapkan kadar kelembaban yang dapat diterima untuk area yang berbeda dalam tumpukan kering, tergantung pada strategi penumpukan. Sebagai contoh, zona struktural eksternal mungkin memiliki kriteria yang lebih ketat dibandingkan zona non-struktural, yang mungkin diizinkan memiliki batasan yang lebih longgar."

Perlu dicatat bahwa fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Indonesia sering kali disebut sebagai "bendungan tailing." Sebagai contoh, menurut Sangadji (2024), "Dalam dokumen resmi mereka, baik HNC [PT HYNC] maupun QMB menyatakan bahwa masing-

masing menghasilkan 6,4 juta ton tailing per tahun … Pada tahun 2023, sekitar 12,5 juta ton limbah yang mengandung besi dan mangan dikirim ke fasilitas penyimpanan, yang oleh kedua perusahaan disebut dalam dokumen Analisis Dampak Lingkungannya sebagai 'bendungan tailing.'" Sebagai contoh kedua, laporan konsultasi untuk fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di proyek PT HPL di Pulau Obi menyebutkan studi mengenai konsekuensi kegagalan fasilitas ini sebagai "analisis jebol bendungan" (PT Lapi ITB, 2020, 2022; SRK Consulting, 2022a).

Karena kemampuannya dalam mengurangi kemungkinan maupun konsekuensi kegagalan fasilitas penyimpanan tailing, teknologi tailing yang difilter saat ini dianggap sebagai teknologi terbaik yang tersedia (*Best Available Technology/BAT*). Menurut laporan panel ahli mengenai kegagalan fasilitas penyimpanan tailing di tambang Mount Polley, "BAT memiliki tiga komponen yang berasal dari prinsip dasar mekanika tanah: 1. Menghilangkan air permukaan dari kolam. 2. Mendorong kondisi tak jenuh dalam tailing dengan menyediakan sistem drainase. 3. Mencapai kondisi dilatif di seluruh endapan tailing melalui pemadatan … Teknologi tailing yang difilter mencakup ketiga komponen BAT tersebut … Tidak ada hambatan teknis utama yang menghalangi adopsi teknologi tailing yang difilter secara lebih luas." Dokumen *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management* juga mewajibkan "penggunaan Teknologi Terbaik yang Tersedia (*Best Available Technology*) untuk tailing, khususnya tailing yang difilter" (Morrill et al., 2022).

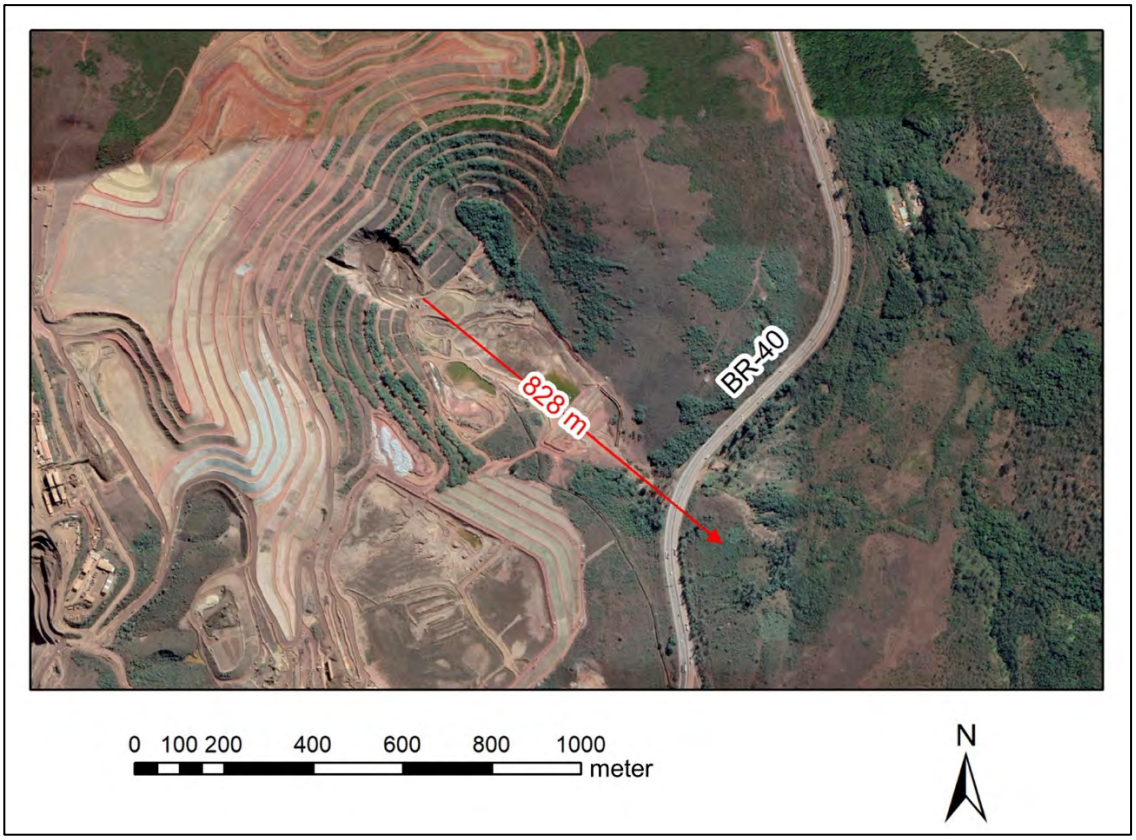
Dalam pembahasan ini, perlu ditegaskan bahwa penggunaan teknologi tailing yang difilter bukanlah sebuah lisensi untuk mengabaikan aspek keselamatan lainnya. Meskipun Twin Metals Minnesota (2022) menulis, "Dry stacking filtered tailings berarti tidak diperlukan bendungan – kegagalan bendungan menjadi mustahil," kegagalan tidak pernah bisa dianggap mustahil. Faktanya, penggunaan teknologi tailing yang difilter justru dapat menimbulkan rasa aman semu yang berujung pada kelalaian. Menurut Oboni dan Oboni (2020), "Tailing yang dikeringkan cenderung menurunkan probabilitas kegagalan ke kisaran bawah dari catatan historis, tentu saja dengan catatan bahwa proses pengeringannya efektif dan tidak menimbulkan pengambilan risiko yang berlebihan berdasarkan janji-janji tersebut." Masalah lain yang berkaitan adalah kurangnya panduan berbasis pengalaman, yang hampir selalu terjadi pada adopsi teknologi baru. Masih menurut Oboni dan Oboni (2020), "Masalahnya adalah bahwa alternatif yang mungkin untuk deposisi slurry belum menciptakan basis pengetahuan yang setara untuk mendukung pengembangan panduan dan protokol profesional dengan kualitas setara dengan deposisi slurry."

Argumen terkuat bahwa kegagalan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter tetap mungkin terjadi adalah bahwa, selain dari kegagalan-kegagalan di Indonesia yang didokumentasikan dalam laporan ini, setidaknya terjadi tiga kegagalan besar fasilitas tailing yang difilter antara tahun 2022 hingga 2024. Kegagalan pertama adalah runtuhnya tumpukan tailing yang difilter setinggi 48 meter di tambang bijih besi Pau Branco milik perusahaan Prancis Vallourec di Brasil pada 8 Januari 2022 (lihat Gambar 14). Runtuhan tersebut menimbun Jalan Raya BR-40, namun tidak menimbulkan korban jiwa (lihat Gambar 15a-b). Kegagalan kedua terjadi pada 24 September 2024, ketika fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik perusahaan tambang Cuzcatlán SA de CV, anak perusahaan dari Fortuna Mining asal Kanada, di Oaxaca, Meksiko, melepaskan air tercemar ke Sungai El Coyote (Desinformémonos, 2024; EDUCA, 2024; lihat Gambar 16). Kontaminasi ini mencapai sumur air minum yang memasok komunitas Magdalena Ocotlán dan San Matías Chilazoa. Sebelumnya dilaporkan bahwa

kegagalan serupa dengan pelepasan air tercemar juga pernah terjadi pada tahun 2018 (Desinformémonos, 2024). Kegagalan ketiga terjadi pada 7 Desember 2024, ketika tumpukan tailing yang difilter runtuh di tambang emas Turmalina, juga di Brasil, yang mengakibatkan sebagian infrastruktur tambang tertimbun, termasuk jalur evakuasi darurat, dan menyebabkan evakuasi 134 warga masyarakat (Petley, 2024; lihat Gambar 17).

Gambar 14. Tumpukan tailing yang difilter setinggi 48 meter runtuh di tambang bijih besi Pau Branco di Brasil pada 8 Januari 2022. Meskipun tailing yang difilter saat ini dianggap sebagai Teknologi Terbaik yang Tersedia (*Best Available Technology*) (Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel, 2015; Morrill et al., 2022), penggunaannya bukan berarti boleh mengabaikan semua aspek keselamatan lainnya. Foto dari Angelo (2022).

Gambar 15a. Berdasarkan lebar jalan raya sebesar 27 meter, runtuhan di fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang Pau Branco di Brasil pada 8 Januari 2022 (lihat Gambar 14), meluas sejauh 104 meter melewati Jalan Raya BR-40. Lebar jalan diukur dari citra Google Earth tanggal 29 Juni 2022 (lihat Gambar 15b). Cuplikan video drone pada detik ke-0:38 (Observatório da Mineração [Observatorium Pertambangan], 2022).



Gambar 15b. Runtuhan dari fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang Pau Branco di Brasil pada 8 Januari 2022 (lihat Gambar 14), meluas sejauh 828 meter dari kaki fasilitas tersebut atau 17,25 kali tinggi fasilitas penyimpanan tailing yang difilter setinggi 48 meter (*Agência Nacional de Mineração* [Badan Pertambangan Nasional], 2025). Latar belakang menggunakan citra Google Earth tanggal 29 Juni 2022.

Isu penting yang perlu diperhatikan adalah bahwa meskipun tailing yang difilter mungkin berada dalam kondisi tidak jenuh saat ditempatkan di fasilitas penyimpanan tailing, tetap diperlukan upaya untuk mencegah kejenuhan ulang pada tailing tersebut agar tidak terjadi likuifaksi di masa depan. Masalah ini menjadi sangat krusial karena target kadar air geoteknis untuk pemadatan maksimum biasanya hanya terpaut beberapa persen dari kadar air geoteknis jenuh. Ruang pori antara partikel tailing dapat kembali jenuh hanya karena konsolidasi di bawah beban tailing tambahan yang menumpuk di atasnya, yang mengurangi volume pori sehingga terisi penuh oleh air (Klohn Crippen Berger, 2017). Bahkan, tidak jarang pada bagian bawah - sepertiga hingga setengah dari tumpukan tailing yang difilter - berada dalam kondisi jenuh. Air juga dapat masuk ke fasilitas penyimpanan tailing yang difilter melalui limpasan permukaan, rembesan air tanah dari bawah, dan curah hujan langsung ke atas permukaan tailing. Sumber-sumber air ini memerlukan pembangunan saluran pengalih yang mengisolasi fasilitas penyimpanan tailing dari daerah aliran sungai sekitarnya serta infrastruktur drainase yang sesuai untuk mengalirkan kelebihan air keluar dari timbunan tailing.

Gambar 16. Pada 24 September 2024, terjadi kegagalan pada fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik perusahaan tambang Cuzcatlán SA de CV, anak perusahaan dari Fortuna Mining asal Kanada, di Oaxaca, Meksiko, yang menyebabkan pelepasan air tercemar ke Sungai El Coyote. Kontaminasi ini meluas hingga mencapai sumur air minum yang memasok komunitas Magdalena Ocotlán dan San Matías Chilazoa. Kegagalan serupa dengan pelepasan air tercemar sebelumnya dilaporkan terjadi pada tahun 2018. Foto dari Desinformémonos (2024).

The aftermath of the 7 December 2024 Turmalina Mine landslide in Brazil. Image posted to LinkedIn by Walinton Sousa.

Gambar 17. Sebuah tumpukan tailing yang difilter runtuh di tambang emas Turmalina di Brasil pada 7 Desember 2024, yang mengakibatkan sebagian infrastruktur pertambangan tertimbun, termasuk jalur evakuasi darurat, serta evakuasi terhadap 134 anggota masyarakat. Meskipun tailing yang difilter saat ini dianggap sebagai Teknologi Terbaik yang Tersedia (*Best Available Technology*) (Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel, 2015; Morrill et al., 2022), penggunaannya bukanlah alasan untuk mengabaikan aspek keselamatan lainnya. Berdasarkan tinggi 19 meter (Agência Nacional de Mineração, 2025) dan jarak luncur 400 meter, runtuhan tailing meluas hingga 21 kali tinggi fasilitas, yang serupa dengan rasio tinggi-jarak luncur pada kegagalan di tambang Pau Branco (lihat Gambar 15a-b). Foto dari Petley (2024).

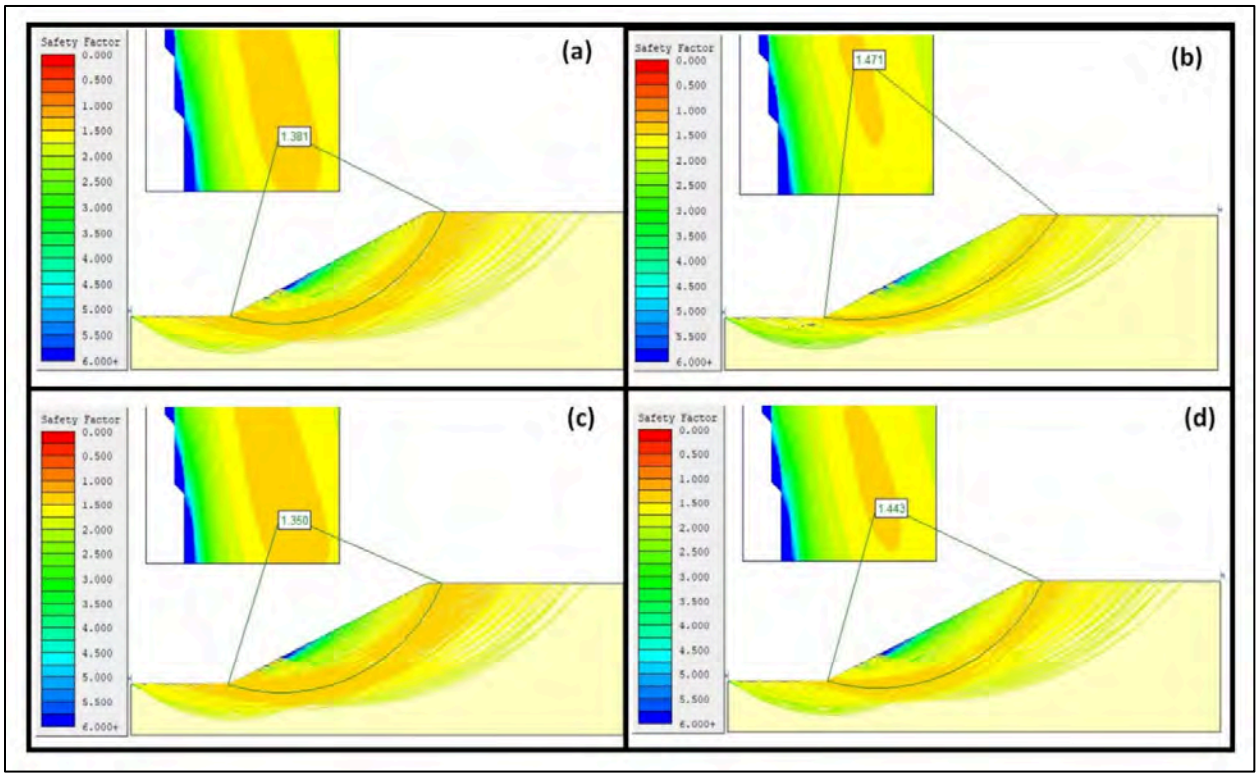
Penting untuk dicatat bahwa fasilitas penyimpanan tailing yang difilter memiliki kemungkinan mekanisme kegagalan lain selain likuifaksi. Sebagai contoh, limpasan permukaan yang mengalir di atas zona struktural dapat mengikis zona tersebut, sehingga mengekspos tailing yang tidak dipadatkan di belakangnya (lihat Gambar 13). Penurunan tanah yang tidak merata atau kegagalan fondasi di bawah fasilitas penyimpanan tailing yang difilter dapat menyebabkan kegagalan seluruh struktur. Akhirnya, zona struktural (bendungan) juga dapat longsor tanpa likuifaksi atau perilaku aliran lainnya. Menurut Klohn Crippen Berger (2017), karena kadar air tailing yang difilter umumnya rendah, "Jika terjadi kegagalan, kemungkinan besar akan berupa longsoran lokal dan konsekuensinya akan terbatas pada area lokal (atau jarak yang setara dengan kira-kira 10 kali tinggi [bendungan tailing]) … " Di sisi lain, perilaku aliran pada tailing dapat terjadi jika tailing bercampur dengan cukup banyak air setelah kegagalan bendungan. Kutipan tersebut berlanjut, "… kecuali material tersebut meluncur ke dalam badan air … Jika terdapat kolam air besar di bagian hilir fasilitas thickened/paste berkepadatan tinggi, kegagalan beruntun dapat terjadi dan harus diperhitungkan saat penyusunan profil risiko dalam pengelolaan kegagalan tailing" (Klohn Crippen Berger, 2017). Pengacu pembahasan di atas, kolam drainase dan penampung limpasan harus ditempatkan cukup jauh di hilir dari fasilitas penyimpanan tailing dan akumulasi air yang berlebihan di kolam-kolam tersebut harus dihindari (Klohn Crippen Berger, 2017; lihat Gambar 13).

Perkiraan jarak luncur untuk longsoran tailing yang difilter menurut Klohn Crippen Berger (2017) tidak didasarkan pada dataset tertentu dan dibuat sebelum terjadinya kegagalan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Brasil (tambang Pau Branco pada 2022 dan tambang Turmalina pada 2024), di mana jarak luncur dapat diukur. Faktanya, kegagalan fasilitas-fasilitas tersebut memungkinkan estimasi jarak longsoran tumpukan tailing yang difilter berdasarkan data empiris. Berdasarkan lebar Jalan Raya BR-40 sebesar 27 meter (diukur dari citra Google Earth tanggal 29 Juni 2022), citra drone setelah kegagalan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang Pau Branco (Observatório da Mineração [Observatorium Pertambangan], 2022) menunjukkan bahwa longsoran meluas sejauh 104 meter melewati jalan raya (lihat Gambar 15a). Dengan demikian, longsoran meluas sejauh 828 meter dari kaki fasilitas penyimpanan tailing (lihat Gambar 15c), atau 17,25 kali tinggi tumpukan setinggi 48 meter (Agência Nacional de Mineração [Badan Pertambangan Nasional], 2025). Untuk kegagalan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang Turmalina, Petley (2024) menggunakan citra drone untuk menunjukkan bahwa longsoran meluas sejauh 400 meter dari kaki fasilitas (lihat Gambar 17). Dengan tumpukan mencapai ketinggian 19 meter (Agência Nacional de Mineração, 2025), longsoran tersebut meluas hingga 21 kali tinggi tumpukan. Singkatnya, jarak longsoran tailing padat dari fasilitas penyimpanan tailing yang difilter, tanpa likuifaksi, diperkirakan sekitar 20 kali tinggi tumpukan. Poin pentingnya adalah bahwa jika longsoran padat membawa tailing ke dalam badan air, maka campuran tailing dan air tersebut dapat berkembang menjadi massa yang benar-benar terlikuifaksi, bahkan jika tidak terjadi likuifaksi awal pada saat longsoran padat terjadi.

Metode Keseimbangan Batas dan Faktor Keamanan

Metode keseimbangan batas (*limit equilibrium method*) mengevaluasi kestabilan massa batuan atau tanah dengan menilai kecenderungan suatu lereng atau struktur untuk gagal apabila sebuah blok kaku bergeser dan menimpa blok lainnya (lihat Gambar 18). Keluaran dari metode ini adalah faktor keamanan (*factor of safety*), yaitu rasio antara gaya penahan terhadap beban,

atau rasio antara kekuatan geser terhadap tegangan geser. Dengan demikian, faktor keamanan sebesar 1,0 menunjukkan lereng yang berada di ambang kegagalan, sedangkan nilai yang lebih tinggi menunjukkan kestabilan yang meningkat. Keterbatasan dari metode keseimbangan batas adalah bahwa tidak semua kegagalan melibatkan pergeseran blok kaku. Sebagai contoh, metode ini tidak dapat menilai kecenderungan suatu lereng untuk gagal akibat rayapan lambat (*creep*) yang dapat mempercepat menjadi gerakan cepat, runtuhan batu (*rockfall*), atau kegagalan yang dikendalikan oleh struktur seperti rekahan atau sesar yang telah ada sebelumnya. Dengan kata lain, metode keseimbangan batas merupakan titik awal yang berguna, tetapi tidak seharusnya menjadi satu-satunya pendekatan dalam analisis kestabilan lereng.



Gambar 18. Faktor keamanan adalah rasio antara kekuatan geser terhadap tegangan geser (rasio antara gaya penahan terhadap beban) pada suatu titik di dalam lereng, tanggul, atau jenis struktur tanah lainnya. Metode keseimbangan batas menggunakan berat jenis, parameter kekuatan geser (kohesi dan sudut gesek dalam), tekanan air pori, dan posisi muka air tanah untuk menghitung faktor keamanan sebagai rata-rata di sepanjang setiap bidang keruntuhan yang mungkin. Bidang keruntuhan dengan faktor keamanan minimum disebut sebagai bidang keruntuhan kritis. Faktor keamanan dari bidang keruntuhan kritis dianggap sebagai faktor keamanan dari struktur tersebut. Faktor keamanan sebesar 1,0 menunjukkan bahwa struktur berada di ambang kegagalan atau, lebih tepatnya, bahwa probabilitas kegagalannya adalah 50%. Gambar dari Sengani dan Allopi (2022).

Data masukan untuk metode keseimbangan batas meliputi topografi (geometri), berat jenis (massa jenis), parameter kekuatan geser (kohesi dan sudut gesek dalam), serta tekanan air pori di seluruh lereng atau struktur dan fondasinya, termasuk posisi muka air tanah. Pemahaman mendalam tentang arti kohesi dan sudut gesek dalam tidak diperlukan dalam laporan ini, kecuali bahwa nilai kohesi dan sudut gesek dalam yang lebih tinggi menunjukkan kekuatan geser yang lebih besar. Material yang jenuh (berada di bawah muka air tanah) memiliki kekuatan geser yang lebih rendah, dan material yang mengalami tekanan air pori berlebih memiliki kekuatan geser

yang bahkan lebih rendah lagi. Metode keseimbangan batas mempertimbangkan semua kemungkinan bidang keruntuhan dan menghitung faktor keamanan di setiap titik sepanjang bidang tersebut (lihat Gambar 18). Faktor keamanan suatu bidang keruntuhan merupakan rata-rata dari faktor keamanan di setiap titik di sepanjang bidang tersebut. Bidang keruntuhan dengan nilai faktor keamanan terendah disebut bidang keruntuhan kritis, dan faktor keamanan dari bidang kritis ini dianggap sebagai faktor keamanan dari lereng atau struktur (lihat Gambar 18). Faktor keamanan dapat dihitung baik untuk pembebanan statik (menghasilkan faktor keamanan statik) maupun pembebanan akibat gempa bumi (menghasilkan faktor keamanan pseudostatik). Respons suatu struktur terhadap gempa bumi disimulasikan dengan analisis pseudostatik, di mana gempa disimulasikan sebagai gaya horizontal yang besarnya sama dengan percepatan seismik rancangan dikalikan massa struktur dan koefisien seismik (yang memperhitungkan pengurangan percepatan akibat interaksi gelombang seismik dengan material yang lebih lunak dibandingkan batuan dasar).

Penting untuk ditekankan bahwa faktor keamanan bukanlah suatu pengukuran langsung, melainkan hasil dari suatu model yang bergantung pada berbagai macam pengukuran, estimasi, dan asumsi. Terdapat ketidakpastian yang cukup besar dalam faktor keamanan akibat ketidakpastian pada data masukan serta keterbatasan dalam pengambilan sampel dari struktur yang parameter geoteknisnya dapat sangat bervariasi secara spasial. Selain itu, terdapat berbagai metode komputasi untuk menjalankan metode keseimbangan batas berdasarkan satu set data masukan tertentu, masing-masing dengan kelebihan dan kekurangannya, sehingga ada ketidakpastian apakah metode komputasi yang digunakan adalah yang paling tepat (Fell et al., 2015). Oleh karena itu, nilai faktor keamanan yang dihitung tidak dapat diasumsikan sama dengan nilai faktor keamanan yang sebenarnya.

Suatu lereng seharusnya tetap stabil selama nilai faktor keamanan yang sebenarnya lebih besar dari 1,0, meskipun harus diingat bahwa metode keseimbangan batas dan hasil faktor keamanannya hanya mengevaluasi jenis kegagalan lereng tertentu dalam cakupan yang sempit. Namun, karena adanya ketidakpastian pada faktor keamanan yang dihitung, praktik rekayasa mengharuskan penggunaan nilai faktor keamanan yang dihitung secara signifikan lebih besar dari 1,0 untuk memastikan bahwa nilai faktor keamanan yang sebenarnya (yang bisa lebih kecil dari nilai yang dihitung) tetap lebih besar dari 1,0. Terdapat banyak publikasi, dokumen pedoman industri, dan peraturan yang membahas nilai minimum faktor keamanan yang tepat. Nilai-nilai minimum ini bergantung pada penerapan dan konteksnya, tetapi nilai minimum faktor keamanan sebesar 1,5 adalah umum untuk banyak aplikasi geoteknik (ANCOLD, 2012, 2019; Fell et al., 2015).

Model Deterministik vs. Statistik untuk Analisis Kegagalan Fasilitas Tailing

Penggunaan model deterministik untuk analisis kegagalan fasilitas penyimpanan tailing dengan perangkat lunak seperti HEC-RAS atau FLO-2D kini sudah mapan dalam industri pertambangan (Canadian Dam Association, 2021; Clohan dan Kidner, 2022). Model deterministik ini dapat menghasilkan prediksi yang sangat rinci, seperti kedalaman aliran, kecepatan aliran, dan waktu kedatangan banjir tailing. Kelemahan dari metode deterministik ini adalah bahwa metode ini memerlukan sejumlah besar parameter masukan, termasuk topografi rinci, detail kerusakan fasilitas (seperti dimensi dan laju perkembangan kerusakan), kekasaran dasar aliran, serta reologi (perilaku aliran) dari tailing. Banyak dari parameter ini kurang

diketahui secara akurat, terutama reologi, sehingga dapat menjadi subjek manipulasi, baik secara sengaja maupun tidak disengaja.

Metode standar dalam rekayasa untuk membangun kepercayaan terhadap model yang didasarkan pada sejumlah besar parameter—beberapa di antaranya kurang diketahui dengan baik—adalah dengan memvalidasi dan kemudian mengkalibrasi model tersebut. Validasi model mengacu pada perbandingan antara prediksi model dengan pengamatan. Misalnya, sebuah kota dapat memiliki model untuk sistem pengelolaan air hujan. Model tersebut harus dapat memprediksi, misalnya, kecepatan aliran atau kedalaman aliran di suatu saluran drainase selama kejadian curah hujan tertentu yang juga dapat diamati. Jika prediksi sangat berbeda dari pengamatan pada kejadian tersebut, maka model harus dipertimbangkan ulang secara menyeluruh. Namun, biasanya, prediksi cukup mendekati, meskipun tidak persis sama dengan pengamatan. Dalam kasus seperti itu, model dikalibrasi, artinya parameter yang paling tidak pasti disesuaikan sampai prediksinya sesuai dengan pengamatan. Dalam kondisi ideal, jenis model deterministik ini terus diperbarui melalui kalibrasi seiring bertambahnya pengamatan yang dapat dibandingkan dengan prediksi.

Masalahnya adalah bahwa model deterministik untuk analisis kegagalan fasilitas penyimpanan tailing tampaknya tidak pernah dikalibrasi. Model semacam itu hanya bisa dikalibrasi jika telah terjadi kegagalan kecil sebelumnya pada suatu fasilitas penyimpanan tailing tertentu dan pengamatan dari kegagalan kecil tersebut digunakan untuk mengkalibrasi model terhadap potensi kegagalan besar di masa depan. Penulis tidak mengetahui adanya model deterministik yang pernah dikalibrasi dalam kondisi tersebut. Oleh karena itu, dalam semua kasus, model deterministik untuk analisis kegagalan fasilitas penyimpanan tailing adalah model yang tidak dikalibrasi karena tidak ada pengamatan (kedalaman aliran, kecepatan aliran, atau waktu kedatangan banjir tailing) untuk dibandingkan dengan prediksi. Dengan kata lain, analisis deterministik kegagalan fasilitas penyimpanan tailing seharusnya memiliki tingkat kepercayaan yang rendah hampir secara definisi.

Alternatif dari ketergantungan pada model deterministik dengan parameter input yang intensif adalah penggunaan model statistik (juga disebut model empiris) yang dikembangkan dari kegagalan fasilitas penyimpanan tailing di masa lalu. Kelemahan dari metode statistik atau empiris ini adalah bahwa metode ini umumnya hanya memberikan perkiraan volume tumpahan dan jarak sebaran (*runout distance*), bukan detail dua dimensi seperti kedalaman aliran, kecepatan aliran, dan waktu kedatangan banjir tailing yang dapat diberikan oleh model deterministik. Kekurangan lain adalah bahwa metode statistik hanya mempertimbangkan tinggi fasilitas tailing dan volume penyimpanan, tanpa memperhitungkan karakteristik lain dari fasilitas tailing, tailing itu sendiri, atau topografi hilir (meskipun karakteristik tersebut bisa jadi juga tidak diketahui secara pasti). Pendekatan terbaik umumnya adalah dengan membandingkan hasil dari model statistik dan model deterministik. Jika sebuah model deterministik menghasilkan prediksi yang sangat berbeda dari model statistik, maka model deterministik tersebut sebaiknya dipertanyakan secara serius. Namun, jika prediksi model deterministik secara umum konsisten dengan kegagalan fasilitas tailing di masa lalu, maka model tersebut layak digunakan untuk menghasilkan prediksi yang lebih rinci dibandingkan yang bisa diperoleh dari model statistik.

Model statistik terbaru dan paling komprehensif untuk analisis kegagalan fasilitas tailing dikembangkan oleh Larrauri dan Lall (2018). Model statistik ini memprediksi volume pelepasan dan jarak sebaran awal tailing setelah kegagalan fasilitas. Jarak sebaran awal adalah jarak yang ditempuh oleh tailing akibat pelepasan energi potensial gravitasi ketika tailing keluar dari

fasilitas penyimpanan. Setelah jarak sebaran awal terhenti, proses fluvial normal dapat mengangkut tailing ke hilir tanpa batas hingga mencapai danau besar atau laut. Ketika jarak sebaran awal mencapai sungai besar, bisa jadi sulit untuk membedakan antara jarak sebaran awal dan proses fluvial normal berikutnya. Misalnya, kegagalan fasilitas penyimpanan tailing di tambang Samarco di Minas Gerais, Brasil, menumpahkan tailing ke Sungai Doce sehingga jarak sebaran awalnya mencapai 637 kilometer hingga Samudra Atlantik (Larrauri dan Lall, 2018).

Meskipun terdapat banyak contoh kegagalan fasilitas penyimpanan tailing, dengan 368 kegagalan yang terdokumentasi dalam basis data Center for Science in Public Participation (2024), Larrauri dan Lall (2018) hanya menemukan 28 yang memiliki informasi cukup untuk pengembangan model statistik (lihat Tabel 3). (Sistem penomoran dalam Tabel 3 mengikuti Larrauri dan Lall (2018)). Menurut Larrauri dan Lall (2018), prediktor terbaik untuk jarak sebaran awal tailing yang dilepaskan adalah faktor bendungan Hf, yang didefinisikan sebagai

$$H_f = H\left(\frac{V_F}{V_T}\right)V_F \tag{1}$$

dimana H adalah tinggi fasilitas (dalam meter), VT adalah total volume tailing dan air yang tertampung (dalam juta meter kubik), dan VF adalah volume tumpahan (dalam juta meter kubik). Berdasarkan 28 contoh, prediksi paling mungkin untuk volume tumpahan dan jarak sebaran awal Dmax (dalam kilometer) adalah (lihat Gambar 19a-b)

$$V_F = 0.332 \times V_T^{0.96} \tag{2}$$

$$D_{max} = 3.01 \times H_f^{0.551} \tag{3}$$

Tabel 3. Pengukuran empiris dari kegagalan fasilitas penyimpanan tailing sebelumnya: Volume tumpahan dan jarak sebaran

No.	Tambang	Tahun	Tinggi Bendungan (m)	Volume Penyimpanan (Mm^3)	Volume Tumpahan (Mm^3)	Jarak Sebaran (km)
Basis Data dari Larrauri dan Lall (2018)						
1	(tidak teridentifikasi), AS Barat Daya	1973	43	0.5	0.17	25
2	Tambang Aitik, Swedia (Boliden Ltd.)	2000	15	15	1.8	5.2
4	Bafokeng, Afrika Selatan	1974	20	13	3	45
5	Balka Chuficheva, Rusia	1981	25	27	3.5	1.3
6	Bellavista, Chili	1965	20	0.45	0.07	0.8
7	Bonsal, North Carolina, AS	1985	6	0.038	0.011	0.8

8	Cerro Negro No. (3 of 5)	1965	20	0.5	0.085	5
9	Cerro Negro No. (4 of 5)	1985	40	2	0.5	8
10	Churchrock, New Mexico, United Nuclear	1979	11	0.37	0.37	110
11	Cities Service, Fort Meade, Florida	1971	15	12.34	9	120
12	Deneen Mica Yancey County, North Carolina, AS	1974	18	0.3	0.038	0.03
13	El Cobre Bendungan Baru	1965	19	0.35	0.35	12
14	El Cobre Bendungan Lama	1965	35	4.25	1.9	12
15	Fundão-Santarem, Minas Gerais, Brasil (Samarco)	2015	90	55	32	637
18	Hokkaido, Japan	1968	12	0.3	0.09	0.15
19	Imperial Metals, Mount Polley, British Columbia, Kanada	2014	40	74	23.6	7
22	Los Frailes, dekat Seville, Spanyol (Boliden Ltd.)	1998	27	15	6.8	41
23	Los Maquis No. 3	1965	15	0.043	0.021	5
24	Merriespruit, Afrika Selatan (Harmony)-Kompleks Tailing No. 4A	1994	31	7.04	0.6	4
25	Mochikoshi No. 1, Jepang (1 dari 2)	1978	28	0.48	0.08	8
27	Olinghouse, Nevada, AS	1985	5	0.12	0.025	1.5
28	Tambang Omai, No. 1, 2, Guyana (Cambior)	1995	44	5.25	4.2	80
29	Tambang Prestavel-Stava, Italia Utara (Prealpi Mineraria)	1985	29.5	0.3	0.2	8
30	Sgurigrad, Bulgaria	1996	45	1.52	0.22	6
31	Stancil, Maryland, AS	1989	9	0.074	0.038	0.1
32	Taoshi, Kota Linfen, Provinsi Shanxi,	2008	50.7	0.29	0.19	2.5

	Tiongkok (Tahsan Mining Co.)					
34	Tyrone, New Mexico (Phelps Dodge)	1980	66	2.5	2	8
35	Veta de Agua (Chili)	1985	24	0.7	0.28	5
	Poin-poin Data Tambahan[1]					
	Brumadinho, Mina Córrego do Feijão, Minas Gerais, Brasil (Vale)	2019	87	12	9.57	600
	Hector Mine Pit Pond, Minnesota, AS	2018	17	0.185	0.123	
	Desa Dahegou, Luoyang, Provinsi Henan, Tiongkok (Luoyang Xiangjiang Wanji Aluminium Co., Ltd.)	2016	45	2	2	2

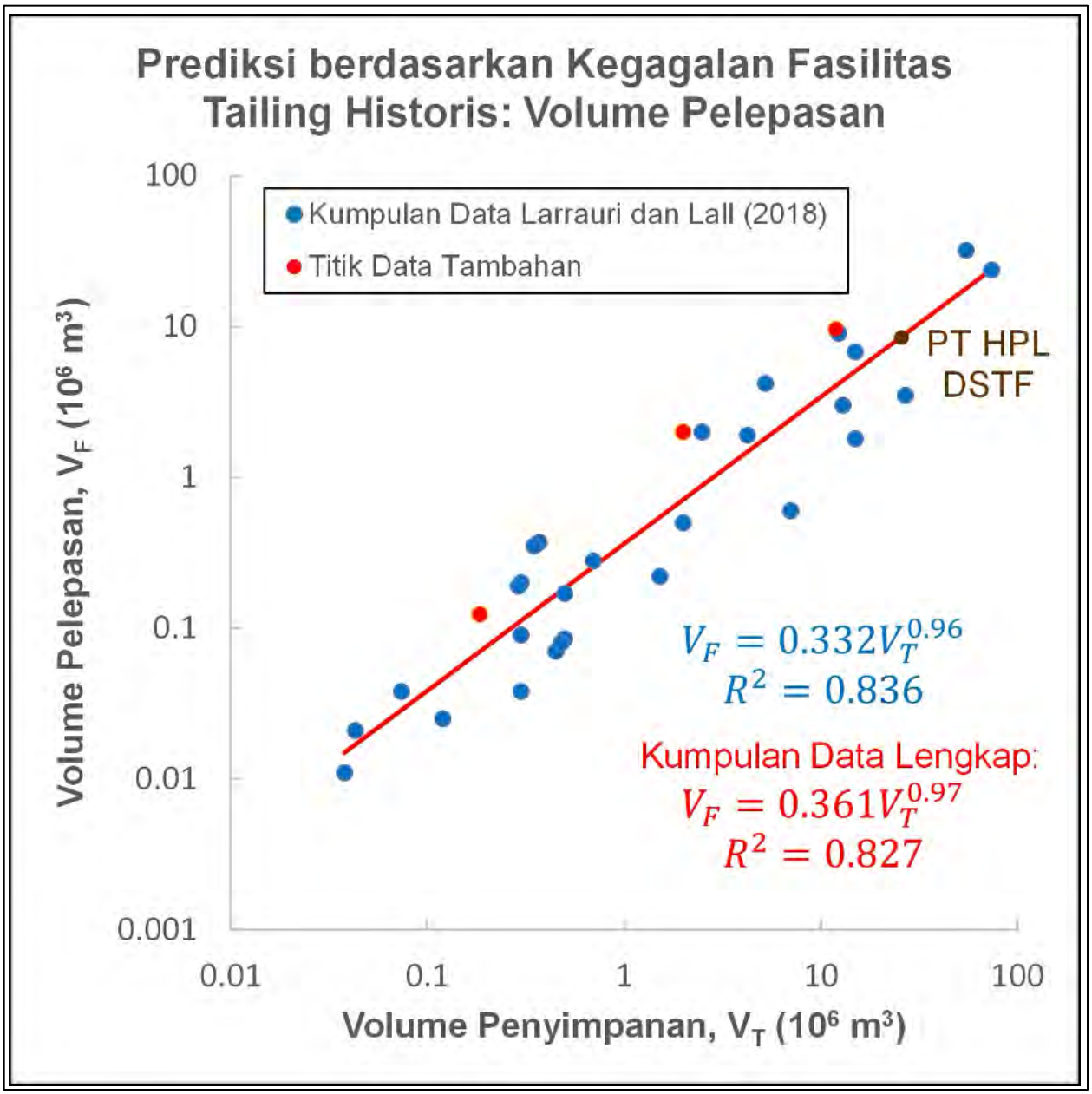
[1] *Center for Science in Public Participation (2024)*

Kegagalan fasilitas penyimpanan tailing terbaru yang dijadikan basis data oleh Larrauri dan Lall (2018) adalah kegagalan di tambang Samarco pada November 2015 (lihat Tabel 3). Basis data dari Center for Science in Public Participation (2024) mencantumkan tiga kegagalan fasilitas penyimpanan tailing yang lebih baru, di mana tinggi fasilitas, volume penyimpanan, dan volume tumpahan diketahui, termasuk dua di antaranya yang juga diketahui jarak sebarannya (lihat Tabel 3). Data tambahan ini menyesuaikan Persamaan (2)-(3) sehingga menghasilkan (lihat Gambar 19a-b)

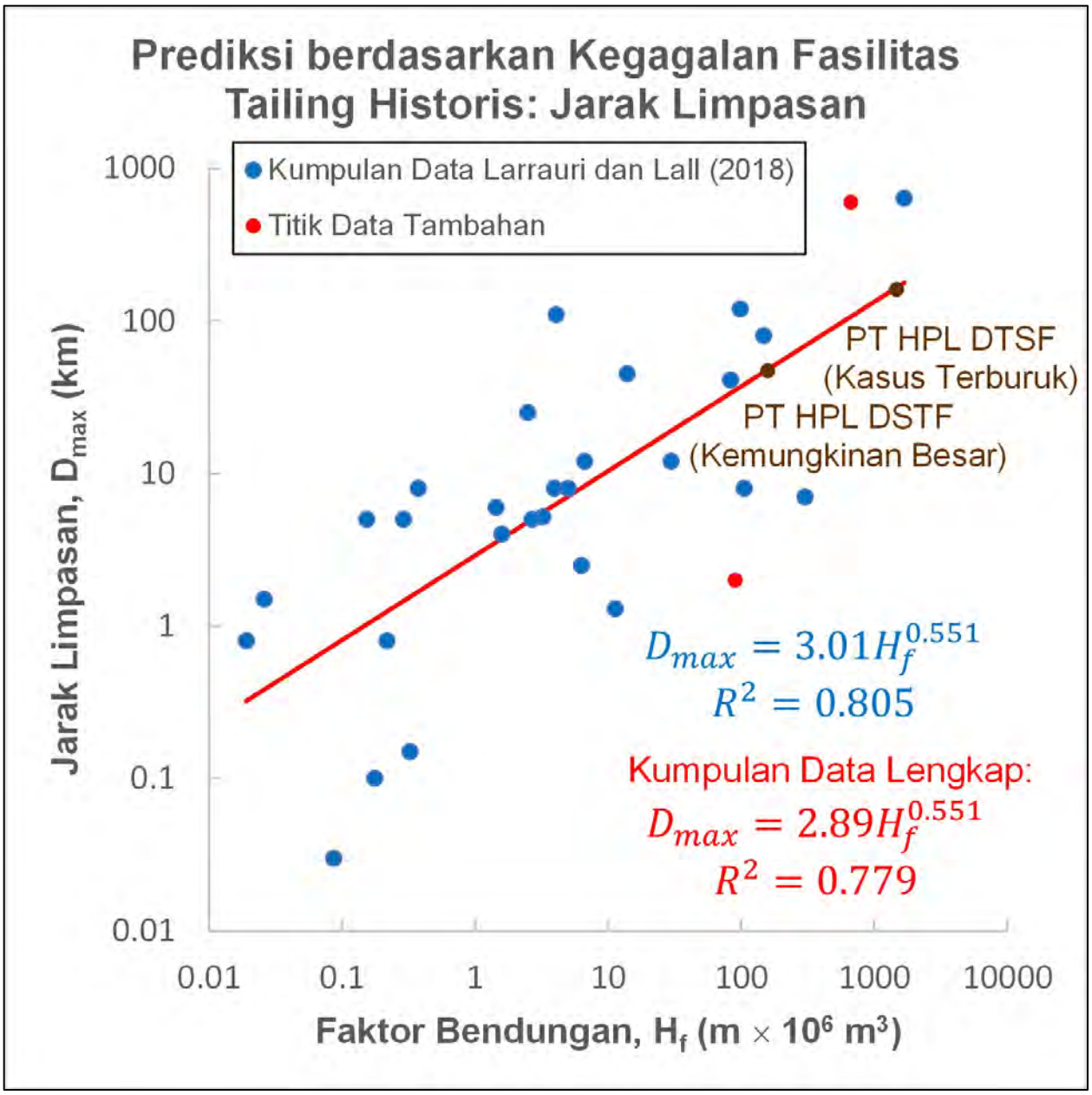
$$V_F = 0.361 \times V_T^{0.97} \tag{4}$$

$$D_{max} = 2.89 \times H_f^{0.551} \tag{5}$$

Dengan demikian, penambahan data baru sedikit meningkatkan volume tumpahan yang diperkirakan untuk volume penyimpanan tertentu (lihat Gambar 19a) dan sedikit menurunkan jarak sebaran yang diperkirakan untuk faktor bendungan tertentu (lihat Gambar 19b).



Gambar 19a. Larrauri dan Lall (2018) menemukan hubungan yang kuat antara volume penyimpanan dan volume tumpahan pada kegagalan fasilitas tailing di masa lalu. Penambahan tiga titik data baru (lihat Tabel 3) sedikit meningkatkan volume tumpahan yang diperkirakan untuk volume penyimpanan tertentu. Hubungan hukum pangkat yang dinyatakan dalam gambar mewakili skenario paling mungkin dari kegagalan fasilitas tailing. Skenario terburuk adalah tumpahan 100% dari tailing yang disimpan, di mana setidaknya terdapat empat contoh yang terdokumentasi. Berdasarkan catatan historis dan volume penyimpanan sebesar 25,8 juta meter kubik, kegagalan Fasilitas Tailing Kering (*Dry Stack Tailings Facility*/DSTF) yang dioperasikan oleh PT HPL (Halmahera Persada Lygend) di Pulau Obi (lihat Gambar 3, 20, dan 34 serta Tabel 1a) akan melepaskan 8,4 juta meter kubik tailing (33% dari volume penyimpanan). Model statistik ini harus dianggap sangat andal dalam kasus DSTF PT HPL karena volume penyimpanan sebesar 25,8 juta meter kubik berada dalam rentang data yang digunakan untuk mengembangkan model statistik. Data dari Larrauri dan Lall (2018) dan Center for Science in Public Participation (2024) (lihat Tabel 3).



Gambar 19b. Larrauri dan Lall (2018) menemukan hubungan yang kuat antara faktor bendungan (fungsi dari tinggi bendungan, volume penyimpanan, dan volume tumpahan; lihat Persamaan 3) dan jarak sebaran pada kegagalan fasilitas tailing di masa lalu. Penambahan dua titik data baru (lihat Tabel 3) sedikit menurunkan jarak sebaran yang diperkirakan untuk faktor bendungan tertentu. Berdasarkan catatan historis dan volume penyimpanan sebesar 25,8 juta meter kubik serta tinggi 57 meter, kegagalan Fasilitas Tailing Kering (*Dry Stack Tailings Facility*/DSTF) yang dioperasikan oleh PT HPL (Halmahera Persada Lygend) di Pulau Obi (lihat Gambar 3, 20, dan 34 serta Tabel 1a) akan menghasilkan jarak sebaran sebesar 47 kilometer dalam skenario paling mungkin (tumpahan 33% dari volume penyimpanan) dan 161 kilometer dalam skenario terburuk (tumpahan 100% dari volume penyimpanan). Oleh karena itu, jarak sebaran sebesar hanya 2200 meter yang diperkirakan oleh PT Lapi ITB (2020) (lihat Gambar 34), bahkan setelah terjadi likuifaksi tailing, tidak realistis dan tidak konsisten dengan catatan historis. Model statistik ini semestinya dianggap sangat andal dalam kasus DSTF PT HPL karena volume penyimpanan sebesar 25,8 juta meter kubik dan tinggi 57 meter berada dalam rentang data yang digunakan untuk mengembangkan model statistik. Data dari Larrauri dan Lall (2018) dan Center for Science in Public Participation (2024) (lihat Tabel 3).

Perlu dicatat bahwa Persamaan (4)-(5) menunjukkan konsekuensi paling mungkin dari kegagalan fasilitas penyimpanan tailing. Secara khusus, konsekuensi yang paling mungkin adalah bahwa kegagalan fasilitas penyimpanan tailing akan mengakibatkan pelepasan sekitar 35% dari tailing yang disimpan (lihat Persamaan (4)). Namun, skenario terburuk adalah bahwa kegagalan fasilitas penyimpanan tailing akan mengakibatkan pelepasan 100% dari tailing yang disimpan. Oleh karena itu, jarak sebaran dalam skenario terburuk (VF = VT) harus dihitung menggunakan Persamaan (5) dengan...

$$H_f = HV_T \tag{6}$$

Terdapat setidaknya empat contoh terdokumentasi tentang kehilangan tailing secara total, termasuk kegagalan Bendungan El Cobre Baru di Chili pada Maret 1965 (350.000 meter kubik), dan kegagalan di tambang batubara Pittston di Buffalo Creek, West Virginia (AS) pada Februari 1972 (500.000 meter kubik), tambang uranium United Nuclear di Churchrock, New Mexico pada Juli 1979 (370.000 meter kubik), dan tambang aluminium Louyang Xiangjiang Wanji di Tiongkok pada Agustus 2016 (2 juta meter kubik) (lihat Tabel 3; Center for Science in Public Participation, 2024). Menurut *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management*, "Skenario kegagalan tailing terburuk harus mempertimbangkan hilangnya seluruh tailing pada kapasitas penuh fasilitas tailing" (Morrill et al., 2022).

Drainase Asam Tambang dan Pelindian Logam

Pembentukan asam terjadi ketika mineral sulfida dari bawah permukaan digali dan terpapar oksigen dan air di permukaan, sehingga reaksi dengan oksigen dan air (disebut oksidasi) mengubah sulfida menjadi asam sulfat. Proses konversi mineral sulfida menjadi asam sulfat ini dipercepat baik oleh penghancuran mineral sulfida, yang meningkatkan luas permukaan yang terpapar oksigen dan air, maupun oleh pembuangan permanen di atas permukaan tanah, yang memungkinkan reaksi pembentuk asam ini berlangsung dalam waktu yang lebih lama. Pembentukan asam dapat terjadi dari pembuangan limbah tambang apa pun di atas permukaan tanah, yang dapat dikategorikan sebagai *non-acid generating* (NAG/tidak menghasilkan asam) atau *potentially acid generating* (PAG/berpotensi menghasilkan asam), tergantung pada konsentrasi mineral sulfida, khususnya jika dibandingkan dengan mineral lain seperti mineral karbonat yang dapat menetralkan pembentukan asam. Pembentukan asam bahkan dapat terjadi akibat terpaparnya dinding pit terbuka atau lorong tambang bawah tanah jika batuan induknya mengandung konsentrasi mineral sulfida yang cukup tinggi.

Reaksi umum pembentukan asam dapat ditulis sebagai reaksi kimia seimbang sebagai berikut:

$$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe^{+2} + 4SO_4^{-2} + 4H^+ \tag{7a}$$

atau dalam kata-kata sebagai berikut:

besi sulfida + oksigen + air → besi terlarut + asam sulfat (7b)

Pirit (besi sulfida) adalah mineral sulfida yang paling umum, tetapi banyak unsur logam lainnya juga membentuk mineral sulfida, seperti arsenopirit (arsenik-besi sulfida atau AsFeS), kalkopirit (tembaga-besi sulfida atau $CuFeS_2$), bornit (tembaga-besi sulfida atau Cu_5FeS_4), galena (timbal sulfida atau PbS), dan sfalerit (seng sulfida atau ZnS). Berdasarkan reaksi di atas, salah satu produk sampingan dari pembentukan asam adalah mobilisasi logam berat ke dalam bentuk terlarut. Oksidasi pirit menghasilkan mobilisasi besi terlarut. Namun, sebagian besar mineral sulfida mengandung berbagai logam berat lainnya yang dapat menggantikan logam utama (seperti pengganti besi dalam mineral pirit), sehingga oksidasi pirit dapat menyebabkan mobilisasi berbagai macam logam berat lainnya.

Drainase asam tambang (AMD) terjadi ketika logam terlarut dan asam sulfat masuk ke dalam air permukaan atau air tanah, yang dapat berdampak buruk pada pasokan air untuk publik dan kehidupan akuatik. AMD di sungai atau aliran air biasanya ditandai oleh warna-warna mencolok dalam rentang merah, coklat, dan kuning, yang dihasilkan dari oksidasi logam terlarut menjadi partikel halus oksida logam atau oksihidroksida logam yang terbawa aliran air. Dalam beberapa keadaan, pelindian logam (pemasukan logam terlarut dari produk samping pertambangan ke dalam air permukaan atau air tanah) dari mineral sulfida juga dapat terjadi tanpa keasaman atau bahkan dalam kondisi basa. Oleh karena itu, aliran air yang terpengaruh oleh pelindian logam netral (tidak asam) dapat memiliki warna yang sama seperti yang terpengaruh oleh AMD. Tentu saja, penentuan adanya AMD memerlukan dukungan pengamatan visual warna dengan pengukuran keasaman dan konsentrasi logam berat. Literatur mengenai AMD dan dampaknya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan sangat luas, dan beberapa titik awal yang baik adalah Maest et al. (2005) dan *Global Acid Rock Drainage Guide* (INAP, 2014).

AMD juga dapat menimbulkan umpan balik positif, di mana beban logam terlarut di hilir bisa jauh melebihi logam terlarut yang dihasilkan langsung dari oksidasi mineral sulfida yang terpapar. Sedimen sungai biasanya mengandung mineral lempung, yang permukaannya memiliki muatan negatif dan mengikat kation (ion bermuatan positif). Sebagian besar logam terlarut adalah kation, meskipun ada beberapa pengecualian seperti arsenik (sebenarnya metaloid), molibdenum, dan uranium, yang muncul dalam bentuk terlarut sebagai oksoanion (ion poliatomik bermuatan negatif yang mengandung oksigen). Ketika air asam berinteraksi dengan sedimen sungai ini, ion hidrogen dalam air menggantikan kation lain (seperti kation logam) dari situs bermuatan negatif pada sedimen sungai, sehingga logam-logam tersebut tidak lagi terikat pada sedimen, tetapi bermigrasi sebagai logam terlarut dalam kolom air. Dasar sungai juga dapat mengandung tailing dari episode pertambangan sebelumnya yang mengandung logam berat yang terikat pada permukaan. Seperti dijelaskan sebelumnya, logam berat ini dapat terlepas akibat masuknya AMD baru ke sungai atau akibat peningkatan keasaman sungai oleh aktivitas manusia lainnya. Karena alasan ini, tailing tambang di dasar sungai sering disebut sebagai "bom waktu kimia".

Uji prediksi terhadap kemungkinan terbentuknya acid mine drainage (air asam tambang) dan pelepasan logam dari timbunan limbah tambang yang terbuka umumnya dibagi ke dalam tiga kategori: uji statik, uji pelindian jangka pendek, dan uji kinetik (jangka panjang). Uji statik digunakan untuk menyaring potensi kontaminan dan untuk mengkategorikan limbah tambang sebagai potensial menghasilkan asam (PAG) atau tidak menghasilkan asam (NAG). Uji ini tidak mempertimbangkan laju reaksi—baik reaksi oksidasi maupun netralisasi—maupun ketersediaan mineral untuk bereaksi secara kimia. Salah satu bentuk uji statik yang umum adalah penilaian

terhadap komposisi unsur dalam limbah tambang guna mendeteksi adanya unsur-unsur kontaminan yang jumlahnya melebihi batas normal. Uji statik yang sering digunakan untuk mengukur potensi pembentukan air asam tambang adalah acid-base accounting, di mana kandungan sulfur atau sulfida dalam limbah dihitung sebagai potensi keasaman (AP), sementara kandungan karbonat atau senyawa lain yang dapat bereaksi dengan asam dihitung sebagai potensi penetralan (NP). AP dan NP biasanya dinyatakan dalam satuan kilogram setara kalsium karbonat ($CaCO_3$) per ton metrik limbah tambang. Nilai NP dan AP ini kemudian digunakan untuk menghitung net neutralization potential (NNP) sebagai selisih antara NP dan AP, serta rasio potensi netralisasi (NPR) sebagai perbandingan NP terhadap AP. Tidak ada batas baku untuk menentukan apakah suatu material tergolong PAG atau NAG berdasarkan nilai NNP atau NPR. Namun, ambang batas umum yang direkomendasikan untuk menyatakan material sebagai PAG berkisar dari NPR kurang dari 1 hingga kurang dari 4 (Maest et al., 2005). Berdasarkan data kinetik tentang kecepatan pelapukan mineral penetral, Scharer et al. (2000) menyimpulkan bahwa timbunan batuan limbah yang bersifat heterogen dengan NPR setinggi 5,0 pun masih dapat menghasilkan air asam tambang dalam jangka panjang. Menurut USEPA (1994), jika perbedaan antara NP dan AP bernilai negatif, maka limbah tersebut memiliki potensi membentuk asam. Jika perbedaan tersebut bernilai positif, maka risikonya cenderung lebih rendah. Namun, prediksi menjadi lebih sulit apabila nilai NNP berada di antara -20 dan 20 kilogram $CaCO_3$ per ton metrik. Uji-uji statik lainnya yang kerap digunakan bersamaan dengan acid-base accounting adalah pengukuran kandungan sulfur piritik dan pengujian pH limbah tambang setelah proses oksidasi, yang dikenal sebagai NAG pH. Ambang batas umum untuk menyatakan suatu limbah sebagai PAG adalah kandungan sulfur piritik lebih dari 0,3% berat dan nilai NAG pH kurang dari 4,5 (INAP, 2014).

Beragam alat telah dikembangkan untuk mitigasi acid mine drainage dan pelepasan logam dari kegiatan pertambangan yang melibatkan penggalian mineral sulfida. Sebagai contoh, pelapisan tailing dengan tanah atau lempung dapat meminimalkan kontak tailing dengan oksigen dan air hujan, sementara saluran pengalihan air hujan di sekitar fasilitas dapat mengurangi kontak dengan air permukaan. Batu kapur yang dihancurkan dapat dicampurkan dengan limbah tambang untuk menetralkan keasaman yang terbentuk. *Liner* kedap air dapat dipasang di bawah fasilitas penyimpanan tailing untuk mencegah rembesan ke air tanah. Sumur pemantau dapat dipasang di sekitar fasilitas tailing untuk menangkap dan mengolah asam tambang yang lolos ke dalam air tanah. Air dari fasilitas tailing juga dapat diolah untuk menghilangkan keasaman dan logam terlarut sebelum dilepaskan ke badan air permukaan. Bahkan, sebagian besar alat yang disebutkan di atas seharusnya digunakan secara bersamaan di setiap lokasi tambang yang mengeksploitasi mineral sulfida, dan tidak boleh bergantung hanya pada satu alat, seperti *liner*. Meskipun alat-alat tersebut tersedia, penting untuk dicatat bahwa hingga saat ini belum ada contoh tambang yang mengeksploitasi endapan bijih sulfida tanpa menghasilkan acid mine drainage atau bentuk kontaminasi lain terhadap air tanah maupun air permukaan (Emerman, 2023a).

Regulas Tailing di Indonesia

Indonesia tidak memiliki satu dokumen tunggal yang mencakup semua peraturan mengenai tailing tambang. Peraturan-peraturan tersebut tersebar dalam dua dokumen yang keduanya berjudul *Tentang Bendungan* (Pemerintah Republik Indonesia, 2010a; Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, 2015) serta satu dokumen berjudul

Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (Pemerintah Republik Indonesia, 2021). Peraturan mengenai tailing sebagian besar terdiri dari prosedur perizinan dan hanya mencakup sedikit standar teknis yang jelas. Yang sangat relevan terhadap laporan ini adalah bahwa Indonesia tidak memiliki standar untuk hal-hal berikut:

1) penempatan keselamatan sebagai prioritas utama dibandingkan pertimbangan lainnya;
2) jarak minimum antara fasilitas penyimpanan tailing dan infrastruktur pertambangan di hilir;
3) jarak minimum antara fasilitas penyimpanan tailing dan pemukiman masyarakat di hilir;
4) jarak minimum antara fasilitas penyimpanan tailing dan sumber pasokan air publik di hilir;
5) kriteria desain banjir atau curah hujan berdasarkan konsekuensi kegagalan atau faktor lainnya;
6) keharusan untuk penyaringan atau pengeringan tailing;
7) nilai minimum faktor keamanan;
8) persyaratan untuk penutupan fasilitas penyimpanan tailing yang aman; dan
9) transparansi atau pengungkapan dokumen-dokumen penting kepada organisasi masyarakat atau lingkungan, maupun kepada pemerintah daerah.

Masalah lainnya adalah tampaknya terdapat perbedaan antara interpretasi peraturan dan teks literal dari peraturan, baik oleh pihak pemerintah maupun organisasi non-pemerintah. Salah satu perbedaan ini berkaitan dengan tidak adanya kriteria desain banjir atau curah hujan pada tingkat literal.

Peraturan bendungan Indonesia dengan jelas menyatakan bahwa peraturan tersebut berlaku baik untuk bendungan penahan air maupun bendungan tailing. Pasal 1 mendefinisikan bendungan sebagai "bangunan yang berupa urukan tanah, urukan batu, beton, dan/atau pasangan batu yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, dapat pula dibangun untuk menahan dan menampung limbah tambang (tailing), atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk" (Pemerintah Republik Indonesia, 2010a). Pasal 5 kemudian menegaskan bahwa "Pembangunan bendungan untuk penampungan limbah tambang (tailing) dan penampungan lumpur mengikuti ketentuan dalam peraturan pemerintah ini" (Pemerintah Republik Indonesia, 2010a). Untuk bendungan air maupun tailing, peraturan Indonesia juga menegaskan perlunya analisis konsekuensi keruntuhan bendungan sebagai komponen penting dari rencana tindakan darurat. Pasal 52 dari *Tentang Bendungan* (Pemerintah Republik Indonesia, 2010a) menyatakan, "Rencana tindak darurat ... harus dilengkapi dengan analisis keruntuhan bendungan."

Dengan kata lain, berdasarkan kutipan tersebut, semua bendungan di Indonesia, tanpa pengecualian untuk bendungan tailing, seharusnya dirancang untuk dapat menahan Probable Maximum Flood (PMF) dan Maximum Credible Earthquake (MCE). Persyaratan agar semua bendungan dirancang untuk menahan PMF dan MCE, tanpa mempertimbangkan konsekuensi dari kegagalan bendungan, akan menjadikan Indonesia memiliki standar keselamatan bendungan terkuat di dunia. Swiss secara umum dianggap memiliki standar keselamatan bendungan paling kuat di dunia. Meskipun Mayangsari dan Adji (2015) merujuk pada peraturan Swiss, tidak ada hubungan eksplisit yang dibuat antara peraturan Swiss tertentu dan peraturan keselamatan bendungan Indonesia. Mayangsari dan Adji (2015) juga tidak menjelaskan bagaimana atau apakah persyaratan untuk merancang semua bendungan agar mampu menahan PMF terkait dengan peraturan yang mereka sebutkan, yaitu Undang-Undang Sumber Daya Air No. 11 Tahun

1974 dan Peraturan Menteri Nomor 72/PRT/1997. Faktanya, persyaratan terkait periode ulang banjir tertentu untuk desain bendungan tidak disebutkan dalam peraturan Indonesia manapun yang mungkin relevan (Pemerintah Republik Indonesia, 2007, 2009, 2010a-b, 2021; Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2015; Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2020). Dua versi dokumen *Tentang Bendungan* (Pemerintah Republik Indonesia, 2010a; Kementerian PUPR, 2015) kemungkinan besar adalah tempat di mana persyaratan seperti itu akan disebutkan jika memang ada.

Persyaratan bahwa semua bendungan harus dirancang untuk menahan Banjir Maksimum yang Mungkin (PMF) dan Gempa Maksimum yang Mungkin (MCE), tanpa memerhatikan konsekuensi dari kegagalan bendungan, akan menjadikan Indonesia sebagai negara dengan standar keselamatan bendungan terkuat di dunia. Selama ini, Swiss secara umum dianggap sebagai negara dengan standar keselamatan bendungan paling ketat di dunia. Meskipun Mayangsari dan Adji (2015) merujuk pada peraturan di Swiss, mereka tidak menjelaskan secara eksplisit keterkaitan antara peraturan di Swiss dengan peraturan keselamatan bendungan di Indonesia. Mayangsari dan Adji (2015) juga tidak menjelaskan apakah, atau bagaimana, persyaratan untuk merancang semua bendungan agar tahan terhadap PMF berkaitan dengan peraturan yang mereka sebutkan, yaitu Undang-Undang Sumber Daya Air No. 11 Tahun 1974 dan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 72/PRT/1997. Faktanya, persyaratan mengenai periode ulang banjir tertentu sebagai dasar perancangan bendungan tidak disebutkan dalam peraturan-peraturan Indonesia yang kemungkinan relevan (Pemerintah Republik Indonesia, 2007, 2009, 2010a-b, 2021; Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2015; Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2020). Peraturan yang paling mungkin mencantumkan periode ulang banjir, jika memang ada, adalah dua versi peraturan *Tentang Bendungan* (Pemerintah Republik Indonesia, 2010a; Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2015).

Pasal 1 dalam Peraturan *Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup* mendefinisikan "Bahan Berbahaya dan Beracun" (disingkat B3) sebagai "zat, energi, dan/atau komponen lain yang karena sifat, konsentrasi, dan/atau jumlahnya, baik secara langsung maupun tidak langsung, dapat mencemarkan dan/atau merusak Lingkungan Hidup, dan/atau membahayakan Lingkungan Hidup, kesehatan, serta kelangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lain" (Pemerintah Republik Indonesia, 2021). Pasal 1 melanjutkan, "Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun yang selanjutnya disebut Limbah B3 adalah sisa suatu usaha dan/atau kegiatan yang mengandung B3" (Pemerintah Republik Indonesia, 2021).

Sering kali tailing secara otomatis diklasifikasikan sebagai Limbah B3, terlepas dari pengukuran toksisitas tailing tersebut. Sebagai contoh, menurut Yayasan Tanah Merdeka (YTM) (2025a-b), "Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup mengelompokkan tailing sebagai Bahan Beracun dan Berbahaya (B3) Spesifik Khusus dengan kategori bahaya 2 (dua) yang dianggap memiliki toksisitas kronis dan berjangka panjang terkait dampak terhadap manusia dan lingkungan hidup. Oleh karena itu, tailing harus diolah sebagai limbah B3." Namun demikian, informasi bahwa semua tailing secara otomatis diklasifikasikan sebagai Limbah B3 tidak dapat ditemukan secara harfiah dalam teks dokumen yang disebutkan (Pemerintah Republik Indonesia, 2021).

Pada saat yang sama, di berbagai bagian, Pemerintah Republik Indonesia (2021) memang menyiratkan bahwa semua tailing adalah Limbah B3. Sebagai contoh, Pasal 400 menyatakan,

"Setelah Persetujuan Teknis untuk kegiatan Dumping (Pembuangan) Limbah B3 terbit, pemegang Persetujuan Teknis wajib ... melakukan netralisasi atau penurunan kadar racun untuk Dumping (Pembuangan) Limbah B3 berupa tailing." Pasal sebelumnya memungkinkan bahwa tailing yang telah disetujui untuk dibuang mungkin secara inheren tidak beracun (sehingga tailing tersebut bukan merupakan Limbah B3) dan mungkin tidak memerlukan penurunan tingkat toksisitas. Namun, tidak jelas apakah peraturan tersebut memang dimaksudkan untuk dibaca secara harfiah seperti itu. Bagaimanapun juga, peraturan di Indonesia secara jelas tidak menentukan tingkat kuantitatif netralisasi atau penurunan toksisitas, yang sejalan dengan ketiadaan standar kuantitatif dalam regulasi tailing di Indonesia secara umum.

Peraturan di Indonesia tidak melarang pembuangan tailing atau bentuk limbah tambang lainnya ke laut dalam. Pasal 392 menyatakan, *"Limbah B3 yang dapat dilakukan Dumping (Pembuangan) Limbah B3 ke media Lingkungan Hidup berupa laut ...*

a. *tailing dari kegiatan pengolahan hasil pertambangan;*
b. *serbuk bor dari hasil pemboran Usaha dan/atau Kegiatan eksplorasi dan/atau eksploitasi di laut menggunakan lumpur bor berbahan dasar sintetis (synthetic-based mud); dan*
c. *serbuk bor dan lumpur bor dari hasil pemboran Usaha dan/atau Kegiatan eksplorasi dan/atau eksploitasi di laut menggunakan lumpur bor berbahan dasar air (water-based mud)."*

[Limbah B3 yang dapat dilakukan Dumping (Pembuangan) Limbah B3 ke media Lingkungan Hidup berupa laut …

a. tailing dari kegiatan pengolahan hasil pertambangan;
b. serbuk bor dari hasil pemboran Usaha dan/atau Kegiatan eksplorasi dan/atau eksploitasi di laut menggunakan lumpur bor berbahan dasar sintetis (synthetic-based mud); dan
c. serbuk bor dan lumpur bor dari hasil pemboran Usaha dan/atau Kegiatan eksplorasi dan/atau eksploitasi di laut menggunakan lumpur bor berbahan dasar air (*water-based mud*).]

(Pemerintah Republik Indonesia, 2021)

Pembuangan tailing ke laut dalam sebaiknya tidak dilakukan di wilayah yang sensitif. Selain itu, pembuangan tailing ke laut dalam lebih disarankan dilakukan di wilayah yang memiliki lapisan termoklin permanen, yaitu lapisan air hangat di permukaan yang dapat menekan arus naik dari dasar laut. Pasal 395 Pemerintah Republik Indonesia (2021) menyatakan, *"Lokasi tempat dilakukan Dumping (Pembuangan) Limbah B3 sebagaimana ... harus memenuhi persyaratan yang meliputi:*

a. *terletak di dasar laut pada laut yang memiliki lapisan termoklin permanen; dan*
b. *tidak berada di lokasi tertentu atau di daerah sensitif sesuai dengan ketentuan peraturan perundang-undangan"*

[Lokasi tempat dilakukan Dumping (Pembuangan) Limbah B3 sebagaimana ... harus memenuhi persyaratan yang meliputi:

a. terletak di dasar laut pada laut yang memiliki lapisan termoklin permanen; dan
b. tidak berada di lokasi tertentu atau di daerah sensitif sesuai dengan ketentuan peraturan perundang-undangan.]

Namun, pembuangan tailing ke laut dalam tetap dapat dilakukan di wilayah yang tidak memiliki lapisan termoklin permanen selama persyaratan tertentu lainnya dipenuhi. Pasal 395 melanjutkan,

"Dalam hal tidak terdapat laut yang memiliki lapisan termoklin permanen ... lokasi tempat

dilakukan Dumping (Pembuangan) Limbah B3 berupa tailing dari kegiatan pengolahan hasil pertambangan harus memenuhi persyaratan lokasi yang meliputi:

a. *terletak di dasar laut dengan kedalaman lebih dari atau sama dengan 100 m (seratus meter);*
b. *secara topografi dan batimetri menunjukkan adanya ngarai dan/atau saluran di dasar laut yang mengarahkan tailing ke kedalaman lebih dari atau sama dengan 200 m (dua ratus meter); dan*
c. *tidak ada* fenomena *up-welling"*

[Dalam hal tidak terdapat laut yang memiliki lapisan termoklin permanen ... lokasi tempat dilakukan Dumping (Pembuangan) Limbah B3 berupa tailing dari kegiatan pengolahan hasil pertambangan harus memenuhi persyaratan lokasi yang meliputi:

a. terletak di dasar laut dengan kedalaman lebih dari atau sama dengan 100 m (seratus meter);
b. secara topografi dan batimetri menunjukkan adanya ngarai dan/atau saluran di dasar laut yang mengarahkan tailing ke kedalaman lebih dari atau sama dengan 200 m (dua ratus meter); dan
c. tidak ada fenomena up-welling.]

Peraturan mengenai tailing di Indonesia tidak melarang pembuangan tailing ke sungai atau badan air tawar lainnya. Namun, satu-satunya tambang di Indonesia yang memiliki izin untuk membuang tailing ke sungai adalah tambang tembaga-emas Grasberg di Papua Barat, yang saat ini dimiliki dan dioperasikan oleh PT Freeport Indonesia, sebuah perusahaan patungan antara perusahaan Amerika Serikat Freeport-McMoRan (48,8%) dan perusahaan milik negara Indonesia, PT Indonesia Asahan Aluminium (51,2%). Tidak ada tambang yang sedang beroperasi di Indonesia yang membuang tailing ke danau, lahan basah, atau badan air lainnya, meskipun praktik tersebut tidak secara eksplisit dilarang. Telah disebutkan sebelumnya bahwa pada tahun 2021 pemerintah Indonesia mengumumkan bahwa tidak ada izin baru yang akan diterbitkan untuk pembuangan tailing ke laut dalam (Nangoy dan Ungku, 2021), meskipun praktik tersebut tidak dilarang dalam peraturan.

Safety First: Panduan Pengelolaan Tailing Tambang yang Bertanggungjawab

Revisi dokumen panduan *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management* (Morrill et al., 2022) dirilis pada bulan Mei 2022, setelah versi pertama diterbitkan dua tahun sebelumnya. Revisi ini mendapat dukungan dari 164 organisasi non-pemerintah, pemerintahan suku, serikat pekerja, dan partai politik. *Safety First* memuat 17 pedoman untuk perancangan, pembangunan, pengoperasian, dan penutupan fasilitas penyimpanan tailing secara aman. Saat ini, *Safety First* mewakili standar tertinggi dalam keselamatan tailing, namun bahkan kepatuhan ketat terhadap seluruh pedoman dalam dokumen ini belum menjamin keselamatan sepenuhnya. Menurut *Safety First*, **"**Mungkin terdapat keadaan di mana suatu fasilitas tailing memenuhi semua pedoman dalam dokumen ini tetapi tetap tidak boleh dibangun atau diizinkan untuk terus beroperasi … Dokumen ini mengakui bahwa fasilitas tailing yang paling aman adalah fasilitas yang tidak pernah dibangun.**"** (Morrill et al., 2022).

Salah satu dokumen yang sering dibandingkan dengan *Safety First* adalah Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM), yang disusun bersama oleh International Council on Mining and Metals (ICMM), United Nations Environment Programme (UNEP), dan Principles for Responsible Investment (PRI), dan diterbitkan pada Agustus 2020 (ICMM-UNEP-

PRI, 2020). Perbedaan utama antara *Safety First* dan GISTM adalah bahwa *Safety First* memiliki standar yang lebih ketat. Selain itu, dalam banyak hal, GISTM kurang dalam hal standar dan lebih berfokus pada prosedur, mirip dengan peraturan tailing di Indonesia. Tujuan dari *Safety First* adalah untuk memaksimalkan perlindungan terhadap manusia dan lingkungan, sedangkan GISTM berusaha mencapai keseimbangan yang tidak dinyatakan secara eksplisit antara menjaga keuntungan perusahaan dan perlindungan terhadap manusia serta lingkungan. Prakata dari GISTM menyatakan, "Standar Industri Global tentang Pengelolaan Tailing (selanjutnya disebut 'Standar') berupaya mencapai tujuan akhir yaitu tanpa bahaya bagi manusia dan lingkungan dengan toleransi nol terhadap kematian manusia. Standar ini mewajibkan Operator untuk bertanggung jawab dan memprioritaskan keselamatan fasilitas tailing, di seluruh fase siklus hidup fasilitas, termasuk saat penutupan dan pasca-penutupan." (ICMM-UNEP-PRI, 2020). Meskipun Prakata GISTM sangat mirip dengan tema dalam *Safety First*, tujuan yang dinyatakan dalam Prakata tersebut tidak diterapkan secara konsisten dalam seluruh isi dokumen. Dua anggota panel ahli yang menyusun rancangan GISTM telah menjelaskan bagaimana industri pertambangan mendominasi proses penyusunan GISTM dan mengecualikan perwakilan masyarakat adat, serikat pekerja, dan komunitas yang terdampak tambang (Hopkins dan Kemp, 2021). Dalam hal standar yang menekankan perlindungan terhadap manusia dan lingkungan, dokumen panduan terbaru berjudul *Tailings Dam Safety Best Practices* (FEMA, 2025) umumnya berada di tingkat menengah antara GISTM dan *Safety First*.

Subbagian selanjutnya mengulas pedoman-pedoman dalam *Safety First* yang paling relevan dengan proyek HPAL yang dibahas dalam laporan ini, yaitu delapan standar yang sebelumnya telah disebutkan sebagai tidak tercantum dalam peraturan tailing Indonesia. Pedoman #1 adalah "Menjadikan keselamatan sebagai prinsip utama dalam perancangan, pembangunan, pengoperasian, dan penutupan" (Morrill et al., 2022). *Safety First* menjelaskan, "Mengingat sifat tailing tambang yang berbahaya, tujuan utama dari pengelolaan tailing haruslah 'memastikan bahwa keselamatan publik, keselamatan lingkungan, dan keselamatan ekonomi menjadi faktor penentu dalam menentukan sistem pembuangan tailing yang akan diterapkan' [University of Victoria Environmental Law Centre, 2019]" (Morrill et al., 2022). Berbeda dengan Prakata dalam GISTM, *Safety First* melanjutkan, "Penting untuk menyadari bahwa pertambangan adalah industri yang pada dasarnya bersifat merusak, yang berarti bahwa tujuan tanpa dampak terhadap lingkungan tidak mungkin tercapai. Namun demikian, perusahaan tambang harus melakukan segala yang mereka bisa untuk meminimalkan kerusakan lingkungan di mana pun. Secara khusus, mereka harus membatasi kerusakan lingkungan yang tak terhindarkan agar tetap berada dalam wilayah lokasi tambang" (Morrill et al., 2022). Pedoman #2 adalah "Persetujuan dari komunitas yang terdampak" (Morrill et al., 2022). Meskipun persetujuan jelas merupakan isu yang sangat penting, isu persetujuan dalam pembangunan fasilitas penyimpanan tailing terfiltrasi di Indonesia berada di luar cakupan laporan ini.

Pedoman #3 membahas isu tentang jarak minimum antara fasilitas penyimpanan tailing dan infrastruktur pertambangan yang berada di hilir, komunitas, serta badan air. Pedoman #3 menyatakan, "Larangan terhadap fasilitas tailing baru di mana terdapat area permukiman di jalur potensi kegagalan bendungan tailing" (Morrill et al., 2022). *Safety First* menjelaskan, "Cara paling efektif untuk meminimalkan risiko terhadap manusia adalah dengan mencegah pembangunan fasilitas tailing baru di lokasi yang dekat dengan populasi yang tinggal atau bekerja di sekitar, di hilir, atau di daerah yang lebih rendah dari fasilitas tersebut. Perusahaan operasi tidak boleh membangun infrastruktur tempat pekerja kemungkinan akan berada—seperti

kantor, kantin, gudang—di zona pengaruh. Zona pengaruh adalah 'area yang akan terkena dampak signifikan jika terjadi kegagalan [fasilitas tailing] dan harus dikategorikan sebagai zona risiko' [University of Victoria Environmental Law Centre, 2019]" (Morrill et al., 2022).

Safety First menetapkan bahwa jarak minimum antara fasilitas tailing dan komunitas bergantung pada waktu yang dibutuhkan untuk evakuasi. Menurut *Safety First*, "Oleh karena itu, jarak minimum antara komunitas dan bendungan baru harus ditentukan secara kasus per kasus. Jarak ini harus dihitung berdasarkan waktu yang dibutuhkan untuk mengevakuasi seluruh komunitas dengan dukungan tim penyelamat serta waktu yang dibutuhkan oleh banjir tailing untuk mencapai komunitas tersebut, dengan penambahan buffer keselamatan dalam perhitungan. Waktu yang dibutuhkan oleh banjir tailing untuk mencapai komunitas harus dihitung berdasarkan studi kegagalan bendungan yang dilakukan khusus untuk fasilitas pembuangan tailing tersebut" (Morrill et al., 2022). Terakhir, *Safety First* juga menetapkan batas pemisah antara fasilitas tailing dan badan air di hilir, meskipun tidak dalam bentuk kuantitatif. Menurut *Safety First*, "Fasilitas tailing tidak boleh dibangun di lokasi di mana kegagalan dapat berdampak material terhadap pasokan air publik atau habitat kritis, atau di dekat sumber daya ekologis yang dilindungi. Selain itu, tailing tidak boleh pernah dibuang ke badan air, seperti sungai, aliran, laut, dan sebagainya" (Morrill et al., 2022).

Pedoman #5 membahas kriteria perancangan fasilitas penyimpanan tailing terhadap banjir dan gempa bumi. Pedoman #5 menyatakan, "Setiap potensi kehilangan nyawa merupakan peristiwa ekstrem dan desain harus merespon sesuai dengan hal tersebut" (Morrill et al., 2022). *Safety First* menjelaskan, "Jika suatu perusahaan tambang, badan regulator, atau pihak ketiga independen mengidentifikasi adanya potensi kehilangan nyawa akibat kegagalan bendungan tailing, maka bendungan tersebut harus dirancang agar mampu menahan *Probable Maximum Flood* (PMF), yaitu banjir terbesar yang secara teoritis dapat terjadi di suatu lokasi, dan *Maximum Credible Earthquake* (MCE), yaitu gempa bumi terbesar yang secara teoritis dapat terjadi di lokasi tersebut. Apabila kegagalan bendungan tailing tidak memiliki potensi menyebabkan kehilangan nyawa, maka fasilitas tersebut harus dirancang untuk menahan banjir dan gempa bumi dengan periode ulang 10.000 tahun" (Morrill et al., 2022).

Pedoman #6 menyatakan, "Wajibkan penggunaan Teknologi Terbaik yang Tersedia (Best Available Technology/BAT) untuk tailing, khususnya tailing terfiltrasi" (Morrill et al., 2022). Dengan demikian, *Safety First* memandang penggunaan teknologi tailing terfiltrasi tidak hanya sebagai praktik terbaik, melainkan sebagai kewajiban. Menurut *Safety First,* "Teknologi dan praktik terbaik yang tersedia dalam pengelolaan tailing akan terus berkembang, tetapi BAT untuk tailing telah dirumuskan oleh *Mount Polley Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel* (Laporan Mount Polley) sebagai berikut: 'Tujuan dari BAT untuk pengelolaan tailing adalah menjamin stabilitas fisik dari endapan tailing. Hal ini dicapai dengan mencegah pelepasan isi bendungan, terlepas dari integritas struktur penahan. Untuk mencapai tujuan ini, BAT memiliki tiga komponen yang didasarkan pada prinsip dasar mekanika tanah: 1. Menghilangkan air permukaan dari bendungan. 2. Mendorong kondisi tidak jenuh dalam tailing dengan menyediakan sistem drainase. 3. Mencapai kondisi dilatan di seluruh endapan tailing melalui pemadatan' [Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel (2015)]" (Morrill et al., 2022).

Safety First menekankan bahwa praktik terbaik tidak menghilangkan semua risiko. Secara khusus, praktik terbaik tetap harus diterapkan dengan benar. Menurut *Safety First,* "Namun demikian, tailing terfiltrasi tidak menghilangkan semua risiko … Meskipun tailing

terfiltrasi dianggap sebagai Teknologi Terbaik yang Tersedia (BAT), tailing terfiltrasi tetap dapat gagal dan penggunaannya bukanlah alasan untuk mengabaikan aspek lain dari keselamatan tailing … Desain fasilitas tailing terfiltrasi harus mencakup sistem drainase yang efektif, serta infrastruktur pengelolaan air untuk mencegah peresapan kembali air ke dalam tailing akibat curah hujan atau limpasan permukaan. Jika terdapat fasilitas tailing yang sudah ada dan menggunakan kolam drainase, maka kolam tersebut harus berjarak aman dari fasilitas tailing guna mencegah kegagalan satu struktur yang dapat mempengaruhi stabilitas struktur lainnya*"* (Morrill et al., 2022).

Pedoman #7 menyatakan, "Terapkan pengendalian keselamatan yang ketat" (Morrill et al., 2022). Di antara berbagai ketentuan dalam pedoman ini, *Safety First* mewajibkan faktor keamanan statik minimum sebesar 1,5, yang sejalan dengan mayoritas besar peraturan dan dokumen panduan internasional (ANCOLD, 2012, 2019; Canadian Dam Association, 2013, 2019; Fell et al., 2015; Government Gazette—Republic of South Africa, 2025; Schnaid et al., 2020; ICOLD, 2022; Ministry of Energy, Mines and Low Carbon Innovation (British Columbia), 2024; FEMA, 2025). Menurut *Safety First,* "Sebagai panduan untuk operasi dan penutupan yang aman, harus ditetapkan dan diterapkan Faktor Keamanan (FoS) yang konservatif, yakni FoS yang paling melindungi manusia, properti, dan lingkungan, untuk semua bendungan tailing. Saat menghitung FoS, nilai input tunggal harus dihindari dan harus digunakan rentang nilai, metode, dan/atau model untuk menilai berbagai kemungkinan nilai FoS (statis dan semi-statis). Untuk pengoperasian dan penutupan bendungan tailing, FoS statik sebesar 1,5 (dalam kondisi tanpa gempa), dan FoS semi-statik sebesar 1,1 (sebagai respons terhadap gempa rancang bangun, yang memastikan bahwa bahkan selama percepatan seismik terkuat yang secara teoritis mungkin terjadi, bendungan masih memiliki daya tahan geser 10% lebih besar dari yang diperlukan untuk menghindari kegagalan), saat ini dianggap sebagai nilai yang konservatif" (Morrill et al., 2022).

Safety First menekankan bahwa penerapan praktik terbaik tidak serta-merta menghilangkan semua risiko. Secara khusus, praktik terbaik tetap harus dilaksanakan dengan benar. Menurut *Safety First*, "Namun demikian, tailing terfiltrasi tidak menghilangkan semua risiko … Meskipun tailing terfiltrasi dianggap sebagai Teknologi Terbaik yang Tersedia (Best Available Technology), tailing terfiltrasi tetap dapat gagal, dan penggunaannya bukanlah alasan untuk mengabaikan aspek-aspek lain dari keselamatan pengelolaan tailing … Desain fasilitas tailing terfiltrasi harus mencakup sistem drainase yang efektif, serta infrastruktur pengelolaan air yang mampu mencegah peresapan kembali air ke dalam tailing akibat curah hujan atau limpasan permukaan. Jika terdapat fasilitas tailing yang telah menggunakan kolam drainase, maka kolam tersebut harus ditempatkan pada jarak yang aman dari fasilitas tailing guna mencegah kegagalan satu struktur yang dapat memengaruhi stabilitas struktur lainnya." (Morrill et al., 2022)

Pedoman #11 berjudul "Menuju penutupan yang lebih aman tanpa mode kegagalan yang kredibel" (Morrill et al., 2022). *Safety First* menekankan bahwa rencana penutupan harus menjadi komponen penting dalam perancangan dan proses perizinan. Menurut *Safety First*, "Sangat penting bahwa reklamasi dan penutupan fasilitas tailing menjadi faktor dalam desain dan penempatan awalnya" (Morrill et al., 2022). *Safety First* mendefinisikan penutupan yang aman sebagai berikut: "Sebuah fasilitas tailing dinyatakan tertutup dengan aman ketika pembuangan tailing telah dihentikan dan semua kegiatan penutupan telah diselesaikan sehingga fasilitas tersebut hanya memerlukan pemantauan, inspeksi, dan pemeliharaan rutin untuk selamanya atau sampai tidak ada lagi mode kegagalan yang kredibel" (Morrill et al., 2022). Konsep mode

kegagalan yang kredibel akan dibahas lebih lanjut dalam subbagian "Tidak Ada Rencana Penutupan" pada bagian "Pulau Obi: Kegagalan Katastropik yang Mengancam."

Konsep perlunya perawatan abadi memerlukan pertimbangan yang cermat dan harus menjadi bagian dari proses perizinan. *Safety First* melanjutkan, "Saat ini, belum ada teknologi yang dapat memastikan bahwa fasilitas tailing aktif dapat ditutup sedemikian rupa sehingga dapat bertahan terhadap PMF atau MCE tanpa pemantauan, inspeksi, dan pemeliharaan abadi … Mengingat bahwa perusahaan operasi tidak akan ada cukup lama untuk melakukan pemantauan, inspeksi, pemeliharaan, dan peninjauan secara abadi, maka kemampuan perusahaan tersebut untuk pada akhirnya menghilangkan semua mode kegagalan yang kredibel harus menjadi pertimbangan utama selama proses perizinan. Jika otoritas regulator tidak yakin bahwa perusahaan dapat melaksanakan perawatan abadi dan tanggung jawab keuangan, atau menghilangkan semua mode kegagalan yang kredibel, maka mereka tidak boleh menyetujui fasilitas tersebut" (Morrill et al., 2022).

Pedoman #15 menyatakan bahwa "Informasi mengenai keselamatan tambang harus tersedia secara publik" (Morrill et al., 2022). *Safety First* menjelaskan, "Perusahaan tambang harus menyediakan semua informasi yang relevan dengan keselamatan dan stabilitas fasilitas tailing kepada publik, termasuk nama, lokasi tepat, kepemilikan, tanggal mulai operasi, luas tapak, dan ketinggiannya. Informasi terkait fasilitas pembuangan tailing harus tersedia untuk umum sejak tahap perancangan dan diperbarui secara berkala selama masa operasi tambang. Perusahaan tambang harus segera mengungkapkan kepada publik tanggal, lokasi, jumlah tailing yang dilepaskan, dan dampaknya terhadap area sekitarnya setelah setiap kegagalan tailing" (Morrill et al., 2022). *Safety First* melanjutkan dengan mencantumkan berbagai jenis dokumen yang wajib disediakan kepada publik dan semua pemangku kepentingan. Menurut *Safety First*, "Informasi ini harus disediakan oleh perusahaan tambang dan regulator tanpa biaya, sesegera mungkin, dalam satu atau lebih bahasa jika diperlukan, dalam format yang dapat diakses, dan menggunakan bahasa yang mudah dipahami jika memungkinkan untuk memberikan akses yang memadai bagi semua pemangku kepentingan yang berkepentingan" (Morrill et al., 2022).

RINGKASAN FASILITAS PENYIMPANAN LIMBAH TAILING YANG DIFILTER DI INDONESIA

Satu-satunya fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Indonesia yang informasi rinci mengenai operasinya tersedia adalah *Dry Stack Tailings Facility* (DSTF) yang saat ini menampung seluruh tailing yang dihasilkan oleh proyek HPAL PT Halmahera Persada Lygend (HPL) di Pulau Obi (lihat Gambar 3 dan Tabel 4). Sebagaimana disebutkan sebelumnya, tailing tersebut tidak benar-benar kering, dan istilah seperti "dry tailings" atau "dry stack" digunakan dalam laporan ini hanya untuk merujuk pada nama resmi fasilitas atau kutipan dari dokumen lain. Faktanya, target kadar air geoteknik dari tailing tersebut adalah 35% (SRK Consulting, 2022a; lihat Tabel 4). Menurut Lu (2023), tailing yang difilter di fasilitas untuk Indonesia Morowali Industrial Park (IMIP) di Pulau Sulawesi (lihat Gambar 3) juga memiliki target kadar air geoteknik sebesar 35%. Souisa (2023) menyebutkan target kadar air geoteknik sebesar 31% untuk fasilitas penyimpanan tailing yang difilter merupakan milik PT Huayue Nickel Cobalt (HYNC), yang berada dalam wilayah IMIP. Target kadar air geoteknik untuk tailing yang difilter di PT Huafei Nickel Cobalt (HFNC) yang berlokasi di Weda Bay Industrial Park, Pulau Halmahera (lihat Gambar 3), telah dilaporkan sebesar 31% (Huayou Cobalt, 2023) dan 30% (Zhejiang Huayou Cobalt, 2024; lihat Tabel 4).

Tabel 4. Fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Indonesia[1]

Nama	Luas Tapak (hektar)	Kapasitas Maksimal (ton metrik)	Kapasitas Malsimal (meter kubik)	Jumlah Tailing per Tahun (ton metrik)	Target Kadar Air (%)
Beroperasi					
PT Halmahera Persada Lygend (HPL)[2]	195[3] 94.9[4]	57,200,000[3] 33,200,000[4]	25,800,000[3]	7,496,050[5]	35[4]
Indonesia Morowali Industrial Park[6]	600[7]	—	—	—	35[8]
PT Huayue Nickel Cobalt (HYNC)[2,9,10,11]	—	—	—	9,300,000[12]	31[10]
PT Qing Mei Bang (QMB) New Energy Materials[2,9]	—	—	—	6,600,000[13]	—
PT Huafei Nickel Cobalt (HFNC)[2,14,15,16]	—	66,000,000[17]	—	17,900,000[18]	31[14] 30[15]
PT Nusa Halmahera Minerals (NHM) Tambang Emas Gosowong[19,20]	—	—	—	800,000[21]	—
Diijinkan dan/atau dalam Pembangunan					
PT Excelsior Nickel Cobalt (ENC)[22,23]	—	—	—	9,600,000[24]	—
Sorowako/PT Huali Nickel Indonesia (HNI)[22,25]	—	—	—	8,600,000[26]	—
Pomalaa/PT Kolaka Nickel Indonesia (KNI)[22,25]	—	—	—	17,900,000[27]	—
Dihentikan atau Dibatalkan					
Sonic Bay[26,29]	—	—	67,000,000[30]	10,350,000[29] 8,000,000[31]	—

[1] Menurut Hidayat et al. (2024) dan Heyokha Brothers (2024), semua proyek HPAL di Indonesia menggunakan atau akan menggunakan teknologi tailing yang difilter. Tabel ini hanya mencakup proyek HPAL yang secara eksplisit menyebutkan penggunaan teknologi tailing yang difilter. Semua fasilitas penyimpanan tailing yang difilter dalam tabel ini merupakan proyek HPAL, kecuali jika disebutkan lain.
[2] Lihat Tabel 1a.
[3] PT Halmahera Persada Lygend (2024)
[4] SRK Consulting (2022a)
[5] Jumlah tailing per tahun untuk 2023 (PT Halmahera Persada Lygend, 2024). Jumlah tailing per tahun adalah 4.605.300 ton metrik pada 2022 dan 1.595.180 ton metrik pada 2021 (PT Halmahera Persada Lygend, 2024). PT

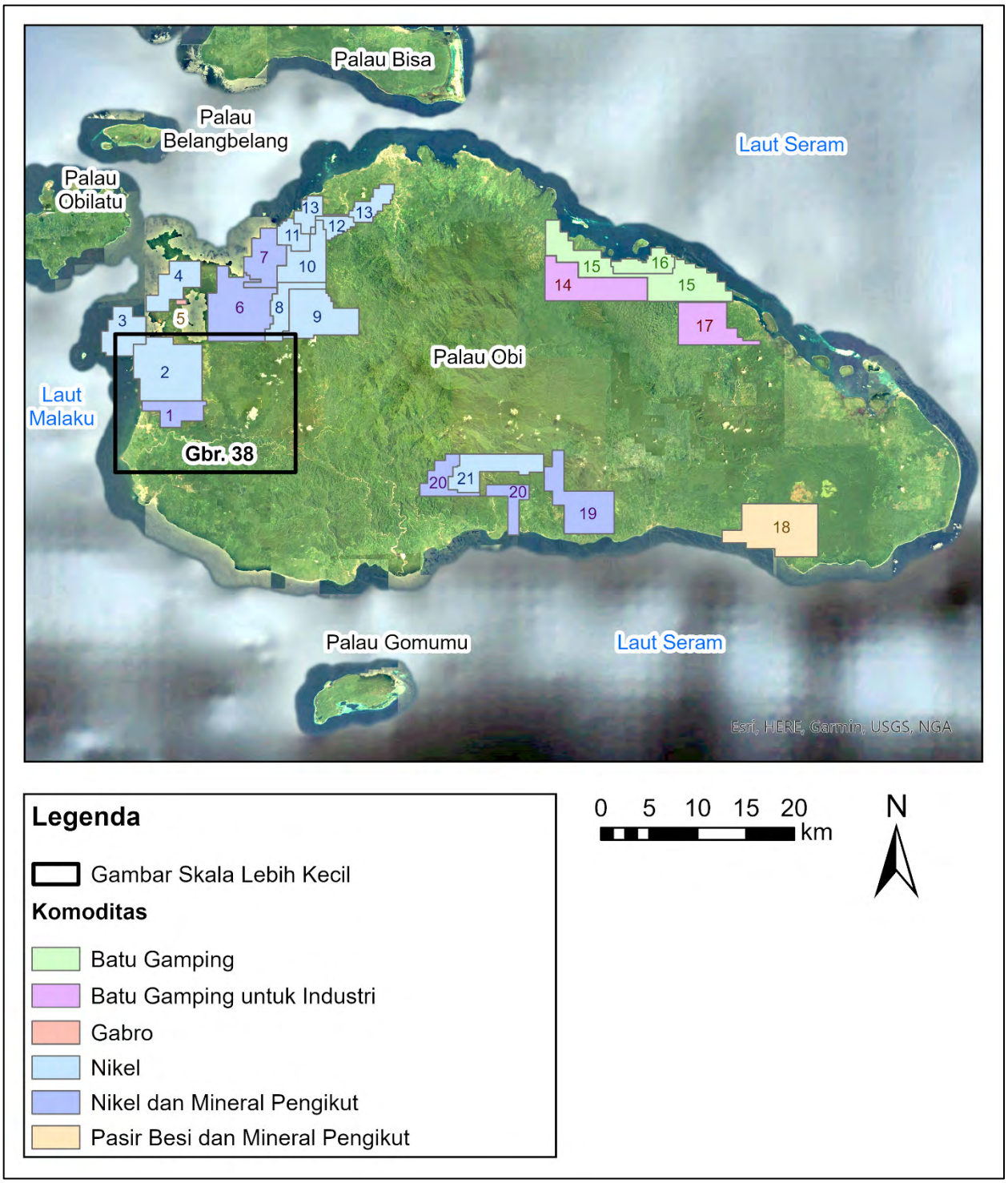
Halmahera Persada Lygend (2024) juga menyatakan bahwa 5,7 juta ton metrik tailing dan 28.399.985 ton metrik tailing disimpan per Desember 2023, yang saling bertentangan dan bertentangan dengan informasi dalam tabel.
[6] Terdapat beberapa fasilitas penyimpanan tailing yang difilter untuk proyek HPAL di Indonesia Morowali Industrial Park (Fisher dan Grossl, 2023; Lee, 2023). Perlu dicatat bahwa PT Huayue Nickel Cobalt dan PT Qing Mei Bang (QMB) New Energy Materials keduanya berlokasi di dalam Morowali Industrial Park (lihat Tabel 1a).
[7] Luas tapak merujuk pada jumlah luas seluruh fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Indonesia Morowali Industrial Park (Lee, 2023).
[8] Lu (2023)
[9] Fisher dan Grossl (2023)
[10] Souisa (2023)
[11] PT Huayue Nickel Cobalt (2021)
[12] Perkiraan dengan mengalikan kapasitas tahunan sebesar 70.000 ton metrik Ni dan Co (IMIP, 2025a; lihat Tabel 1a) dengan rasio tailing terhadap logam sebesar 133 (dijustifikasi dalam teks).
[13] Perkiraan dengan mengalikan kapasitas tahunan sebesar 50.000 ton metrik Ni dan Co (IMIP, 2025b; lihat Tabel 1a) dengan rasio tailing terhadap logam sebesar 133 (dijustifikasi dalam teks).
[14] Huayou Cobalt (2023)
[15] Zhejiang Huayou Cobalt (2024)
[16] International Mining (2022)
[17] Mecater Ingénierie (2023a)
[18] Perkiraan dengan mengalikan kapasitas tahunan sebesar 120.000 ton metrik Ni dan 15.000 ton metrik Co (Nangoy, 2023; lihat Tabel 1a) dengan rasio tailing terhadap logam sebesar 133 (dijustifikasi dalam teks).
[19] Tambang Emas Gosowong milik PT Nusa Halmahera Minerals (NHM) bukan proyek HPAL.
[20] Tampi (2024)
[21] NHM Gosowong Gold Mine (2025)
[22] Lihat Tabel 1b.
[23] Nickel Industries (2025)
[24] Perkiraan dengan mengalikan kapasitas tahunan sebesar 72.000 ton metrik Ni (Nickel Industries, 2025; lihat Tabel 3b) dengan rasio tailing terhadap logam sebesar 133 (dijustifikasi dalam teks).
[25] Silva (2023)
[26] Perkiraan dengan mengalikan kapasitas tahunan sebesar 60.000 ton metrik Ni dan 5.000 ton metrik Co (Nickel Industries, 2025; lihat Tabel 1b) dengan rasio tailing terhadap logam sebesar 133 (dijustifikasi dalam teks).
[27] Perkiraan dengan mengalikan kapasitas tahunan sebesar 120.000 ton metrik Ni dan 15.000 ton metrik Co (Vale, 2025; lihat Tabel 1b) dengan rasio tailing terhadap logam sebesar 133 (dijustifikasi dalam teks).
[28] Lihat Tabel 1d.
[29] Saputra et al. (2023)
[30] Mecater Ingénierie (2023b)
[31] Perkiraan dengan mengalikan kapasitas tahunan sebesar 60.000 ton metrik Ni (IndoPremier, 2024; lihat Tabel 1d) dengan rasio tailing terhadap logam sebesar 133 (dijustifikasi dalam teks).

Belum ada informasi yang benar-benar pasti mengenai fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT Obi Nickel Cobalt (ONC), yang juga berlokasi di Pulau Obi (lihat Gambar 3). PT HPL dan PT ONC memiliki kepemilikan yang saling tumpang tindih, karena PT HPL dimiliki oleh PT Trimegah Bangun Persada (45,1%) dan Ningbo Lygend Mining (54,9%), sedangkan PT ONC dimiliki oleh PT Trimegah Bangun Persada (10%), Ningbo Lygend Mining (60%), dan Harita Group (30%) (lihat Tabel 1a). Harita Group sendiri merupakan pemilik mayoritas (86,48%) dari PT Trimegah Bangun Persada melalui anak perusahaannya, PT Harita Jayaraya (TBP dan Harita Nickel, 2025). Terdapat potensi yang cukup besar untuk pembangunan fasilitas penyimpanan tailing lebih lanjut di Pulau Obi. Per Agustus 2023, pulau ini telah dibagi ke dalam 21 konsesi pertambangan, mencakup area seluas 470,5322 kilometer persegi, termasuk 15 konsesi pertambangan untuk nikel dan produk turunan nikel, yang mencakup 311,7758 kilometer persegi (lihat Tabel 5 dan Gambar 20). Dengan demikian, per Agustus 2023, sebanyak 18,5% dari total luas daratan Pulau Obi telah dialokasikan untuk konsesi pertambangan.

Tabel 5. Konsesi Pertambangan di Pulau Obi[1]

No.[2]	Perusahaan	Komoditas	Status	Area (ha)
1	PT Gane Permai Sentosa	Nikel dan produk-produk turunannya	Produksi	1276.99
2	PT Trimegah Bangun Persada	Nikel	Produksi	4247
3	PT Rimba Kurnia Alam	Nikel	Produksi	1800
4	PT Wanatiara Persada	Nikel	Produksi	1725.54
5	PT Mineral Perkasa Sentosa	Gabbro	Eksplorasi	58.64
6	PT Obi Putra Mandiri	Nikel dan produk-produk turunannya	Produksi	4058
7	PT Jikodolong Megah Pertiwi	Nikel dan produk-produk turunannya	Produksi	884.84
8	PT Halim Pratama	Nikel	Produksi	1317
9	PT Mulia Putra Sejahtera	Nikel	Produksi	2967.75
10	PT Intim Mining Sentosa	Nikel	Produksi	1935
11	PT Anugrah Bukit Besar	Nikel	Produksi	853.6
12	PT Aneka Tambang Resources Indonesia	Nikel	Produksi	607.88
13	PT Obi Anugerah Mineral	Nikel	Produksi	1775.4
14	PT Obi Mayor Nusantara	Batu Kapur Industri	Eksplorasi	3153
15	PT Budhi Java Mineral	Batu Kapur	Produksi	4711
16	PT Cita Karya Sejahtera	Batu Kapur	Eksplorasi	1146
17	PT Gamping Adika Sejahtera	Batu Kapur Industri	Cadangan	2517
18	PT Bela Sarana Permai	Pasir mineral berat dan produk turunannya	Produksi	4290
19	PT Intim Mining Sentosa	Nikel dan produk-produk turunannya	Produksi	3185
20	PT Serongga Sumber Lestari	Nikel dan produk-produk turunannya	Produksi	2229.58
21	PT Gane Tambang Sentosa	Nikel	Produksi	2314

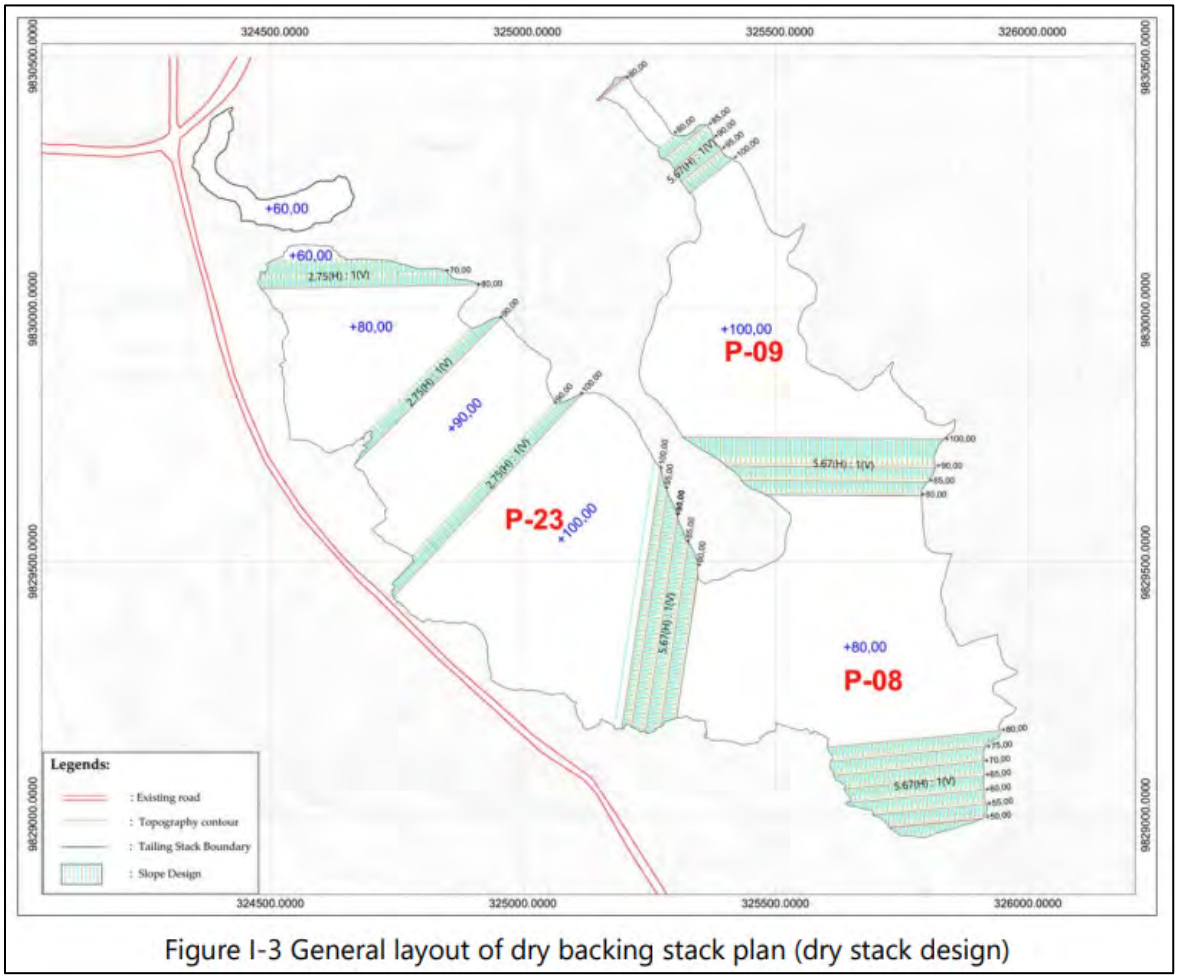
[1] Data dari MOMI (2023) diakses pada 15 Agustus 2023
[2] Penomoran konsesi oleh penulis (lihat Gambar 20).



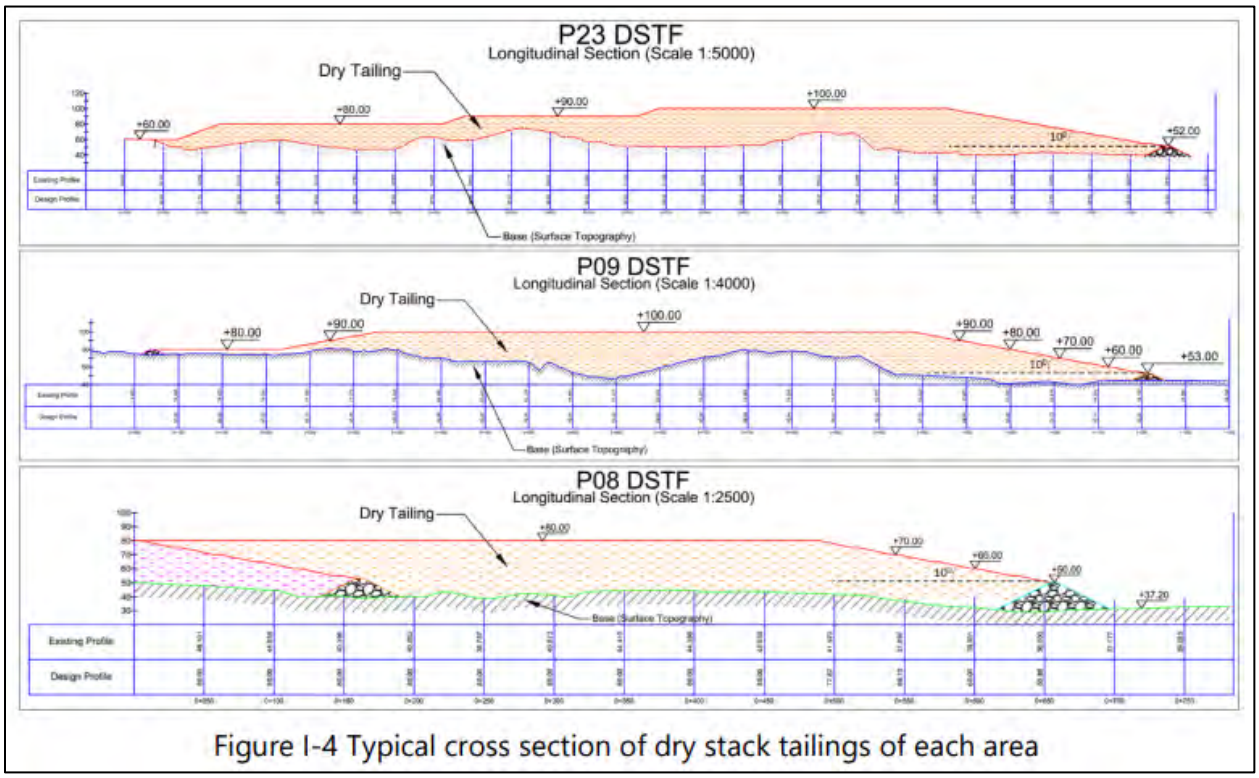
Gambar 20. Per tanggal 15 Agustus 2023, terdapat 21 konsesi pertambangan di Pulau Obi yang mencakup luas 470,5322 kilometer persegi, termasuk 15 konsesi pertambangan untuk nikel dan produk turunannya dengan luas 311,7758 kilometer persegi (lihat Tabel 5). Penomoran dilakukan oleh penulis. Data dari MOMI (2023).

Pada akhir masa operasionalnya, DSTF milik PT HPL akan memiliki ketinggian 57 meter, luas tapak 195 hektar, dan kapasitas maksimum sebesar 57,2 juta ton metrik atau 25,8 juta

meter kubik tailing (PT Halmahera Persada Lygend (2024); lihat Tabel 4). Dengan demikian, target densitas kering (densitas partikel padat, tidak termasuk air) adalah 2,22 ton metrik per meter kubik, yang berada dalam kisaran industri pertambangan yaitu antara 1,9 hingga 2,6 ton metrik per meter kubik, dengan nilai tipikal sebesar 2,0 ton metrik per meter kubik (Cacciuttolo Vargas dan Pérez Campomanes, 2022). DSTF di tambang PT HPL sedang dibangun dalam tiga tahap, dimulai dari P-23, kemudian ke P-09, dan diakhiri dengan P-08 (lihat Gambar 21). Konstruksinya mencakup tanggul batu sementara dan permanen, yang terdiri dari fragmen kasar batuan ultrabasa dengan sedikit kandungan tanah, semuanya diperoleh dari lokasi tambang (PT Lapi ITB, 2022; lihat Gambar 22). Tailing ditumpuk jauh lebih tinggi daripada puncak tanggul batu tersebut (lihat Gambar 22). Oleh karena itu, tanggul batu tersebut sebenarnya tidak berfungsi sebagai bendungan, karena jika tailing mengalami likuifaksi, material tersebut dapat dengan mudah mengalir melampaui puncak tanggul (lihat Gambar 22). Densitas aktual dan kapasitas maksimum berdasarkan massa akan dibahas dalam bagian "Pulau Obi: Kegagalan Katastropik yang Mengancam," dengan salah satu kemungkinannya adalah tanggulnya yang relatif pendek.



Gambar 21. Fasilitas Tailing yang Difilter dan Ditumpuk Kering (Dry Stack Tailings Facility/DSTF) di tambang PT HPL sedang dibangun dalam tiga tahap, dimulai dari P-23, kemudian berlanjut ke P-09, dan diakhiri dengan P-08. Tanggul batu ditunjukkan dengan garis-garis hijau. Lihat penampang memanjang dari ketiga tahap tersebut pada Gambar 22. Gambar dari PT Lapi ITB (2022).



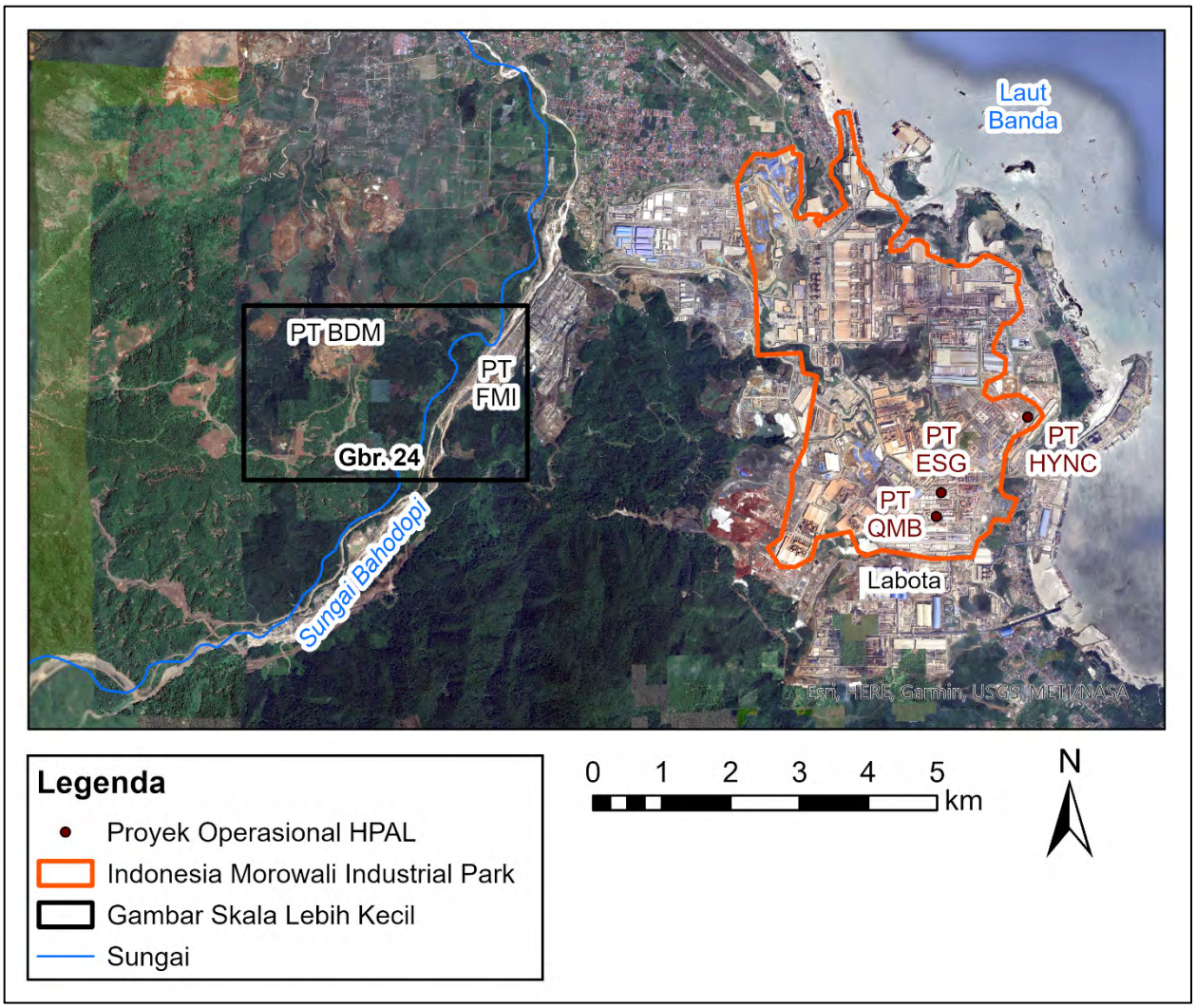
Gambar 22. Fasilitas Tailing yang Difilter dan Ditumpuk Kering (DSTF) di tambang PT HPL sedang dibangun dalam tiga tahap, dimulai dari P-23, kemudian ke P-09, dan diakhiri dengan P-08. Ketinggian maksimum akan mencapai 57 meter (lihat Tabel 1a). Tailing ditumpuk jauh lebih tinggi daripada puncak tanggul batu. Oleh karena itu, tanggul batu tidak benar-benar berfungsi sebagai bendungan. Jika tailing mengalami likuifaksi, material tersebut dapat dengan mudah mengalir melewati puncak tanggul. Lihat tampak atas dari ketiga tahap pada Gambar 21. Gambar dari PT Lapi ITB (2022).

Menurut PT Trimegah Bangun Persada (2023a), produksi tailing tahunan di PT HPL adalah sebesar 7.496.050 ton metrik pada tahun 2023, 4.605.300 ton metrik pada tahun 2022, dan 1.595.180 ton metrik pada tahun 2021. Karena proyek PT HPL telah beroperasi pada kapasitas maksimum pada tahun 2023 (PT Halmahera Persada Lygend, 2023a), maka dapat diasumsikan bahwa laju produksi tailing tahunan tersebut akan terus berlanjut di masa depan, sehingga kapasitas desain DSTF (57,2 juta ton metrik) akan tercapai sebelum akhir tahun 2029. PT Halmahera Persada Lygend (2023a) menyatakan bahwa kapasitas maksimum (*nameplate capacity*) adalah sebesar 50.000 ton metrik nikel dan 6.500 ton metrik kobalt, sehingga rasio tailing terhadap logam adalah 133, yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan rasio 100 yang diasumsikan oleh Sangadji dan Ginting (2023) dan Sangadji (2024) atau rasio 125 yang diasumsikan oleh Fisher dan Grossl (2023). Karena tidak ada perbandingan lain mengenai produksi tailing dan logam untuk proyek HPAL tertentu di Indonesia, maka laporan ini akan mengasumsikan rasio tailing terhadap logam sebesar 133.

Rasio tailing terhadap logam dapat digunakan untuk memperkirakan laju produksi tailing oleh proyek HPAL di Indonesia. Kapasitas tahunan untuk tujuh proyek HPAL yang telah beroperasi adalah sebesar 405.000 ton metrik nikel dan 26.500 ton metrik kobalt (lihat Tabel 1a). Sebanyak 14 proyek HPAL yang telah mendapat izin dan/atau sedang dalam tahap konstruksi, termasuk delapan proyek baru di Kawasan Industri Morowali Indonesia, memiliki kapasitas

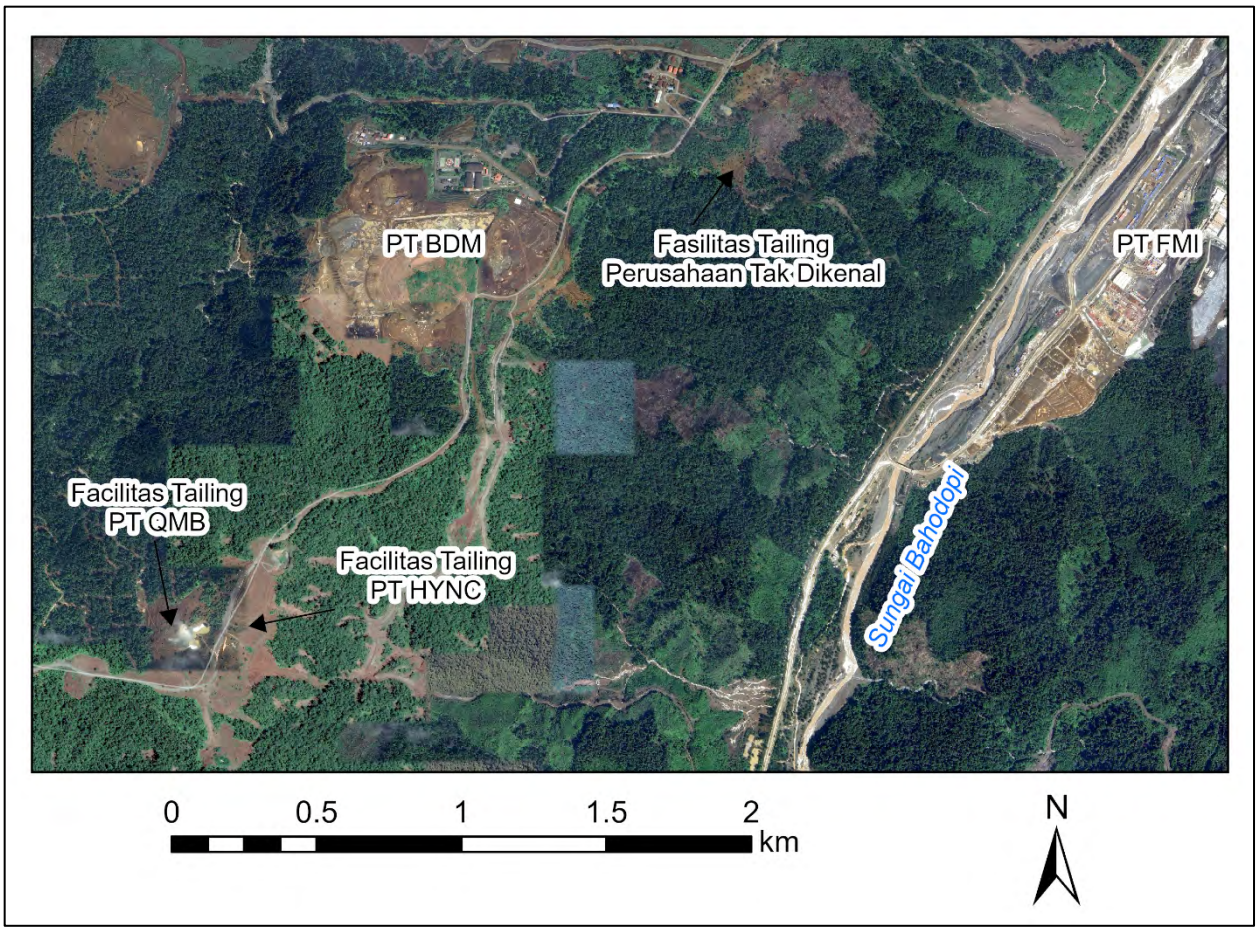
tahunan gabungan sebesar 850.900 ton metrik nikel dan 38.800 ton metrik kobalt (lihat Tabel 1b). Meskipun, seperti telah disebutkan sebelumnya, perbedaan antara proyek yang telah diizinkan dan yang masih dalam tahap proposal tidak selalu jelas, tambahan 12 proyek HPAL yang berada dalam tahap proposal, termasuk tiga proyek lagi di Pulau Obi, akan memiliki kapasitas tahunan gabungan sebesar 745.900 ton metrik nikel (lihat Tabel 1c). Dengan demikian, kapasitas tahunan dari seluruh proyek yang telah beroperasi dan diizinkan adalah 1.255.900 ton metrik nikel dan 65.300 ton metrik kobalt, sedangkan kapasitas tahunan dari seluruh proyek yang telah beroperasi, diizinkan, dan diusulkan adalah 2.001.800 ton metrik nikel dan 65.300 ton metrik kobalt. Dua proyek HPAL di Kawasan Industri Weda Bay yang saat ini dihentikan atau dibatalkan akan memiliki kapasitas tahunan gabungan sebesar 183.000 ton metrik nikel dan 15.000 ton metrik kobalt. Sebagai ringkasan, berdasarkan rasio tailing terhadap logam sebesar 133, laju produksi tahunan tailing HPAL oleh seluruh proyek yang beroperasi, seluruh proyek yang beroperasi dan diizinkan, serta seluruh proyek yang beroperasi, diizinkan, dan diusulkan masing-masing adalah sebesar 57 juta ton metrik per tahun, 176 juta ton metrik per tahun, dan 275 juta ton metrik per tahun.

Terdapat beberapa fasilitas penyimpanan tailing yang difilter untuk proyek HPAL di Kawasan Industri Morowali Indonesia dengan total luas lahan sebesar 600 hektare (Fisher dan Grossl, 2023; Lee, 2023; lihat Tabel 4). Menurut para pekerja tambang, fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT Huayue Nickel Cobalt (HYNC) dan PT Qing Mei Bang (QMB) New Energy Materials berada di lokasi yang disebut KM8 atau IMIP8, sekitar 7,5 kilometer di sebelah barat Kawasan Industri Morowali Indonesia, di mana fasilitas tailing PT QMB terletak di barat laut jalan raya dan fasilitas tailing PT HYNC terletak di tenggara jalan raya (lihat Gambar 23–24). Luas gabungan dari fasilitas tailing PT HYNC dan PT QMB kurang dari 20 hektare, sehingga kemungkinan besar terdapat fasilitas penyimpanan tailing lainnya di tempat lain di Pulau Sulawesi. Para pekerja tambang telah mengidentifikasi lokasi lain sekitar dua kilometer di barat laut fasilitas tailing PT HYNC/PT QMB sebagai lokasi fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik perusahaan yang tidak diketahui, yang bisa saja milik PT HYNC atau PT QMB, atau kemungkinan PT ESG New Energy Material atau PT Meiming New Energy Material, yang mulai berproduksi pada tahun 2025 (lihat Tabel 1a). Menurut Fisher dan Grossl (2023), "Tailing [untuk PT HYNC] dikirim ke lokasi *dry stack* — yang berjarak 7,5 kilometer [kemungkinan mengacu pada lokasi KM8] ... Lokasi tailing *dry stack* [untuk PT QMB] bahkan lebih jauh dibandingkan dengan PT Huayue, sekitar 10 hingga 15 kilometer dari operasi HPAL." Perlu dicatat bahwa bahkan lokasi pabrik HPAL untuk PT Meiming New Energy Material di dalam Kawasan Industri Morowali Indonesia pun belum diketahui (lihat Gambar 23). Pertanyaan apakah PT QMB dan PT HYNC memiliki fasilitas tailing terpisah di lokasi KM8 atau IMIP8 atau apakah keduanya menggunakan fasilitas yang sama, serta pengakuan perusahaan bahwa KM8 adalah lokasi fasilitas penyimpanan tailing, akan dibahas lebih lanjut dalam bagian "Pulau Sulawesi: Kegagalan Katastropik yang Sedang Berlangsung."



Gambar 23. Satu-satunya proyek HPAL yang sedang beroperasi di Kawasan Industri Morowali Indonesia (IMIP) adalah PT Huayue Nickel Cobalt (HYNC), PT Qing Mei Bang (QMB) New Energy Materials, PT ESG New Energy Material, dan PT Meiming New Energy Material (lihat Tabel 1a). Namun, terdapat tambahan delapan proyek HPAL yang telah diizinkan atau sedang dalam tahap konstruksi di dalam IMIP (lihat Tabel 1b). Lokasi pasti dari PT Meiming New Energy Material belum diketahui. Batas Kawasan Industri Morowali Indonesia diambil dari AidData (2025) dan aliran sungai dari EnergyData.info (2020).

Berdasarkan kapasitas tahunan sebesar 70.000 ton metrik nikel dan kobalt (IMIP, 2025a) dan rasio tailing terhadap logam sebesar 133, PT HYNC saat ini menghasilkan 9,3 juta ton metrik tailing per tahun (lihat Tabel 4). Berdasarkan kapasitas tahunan sebesar 50.000 ton metrik nikel dan kobalt (IMIP, 2025b) dan rasio tailing terhadap logam yang sama, PT QMB saat ini menghasilkan 6,6 juta ton metrik tailing per tahun. Kapasitas maksimum PT ESG New Energy Material dan PT Meiming New Energy Material masing-masing adalah 30.000 ton metrik nikel (IndoPremier, 2024) dan 25.000 ton metrik nikel (Merdeka Battery Materials, 2025) (lihat Tabel 1a). Oleh karena itu, ketika keempat proyek HPAL di Kawasan Industri Morowali Indonesia beroperasi pada kapasitas maksimumnya, kemungkinan pada pertengahan tahun 2026, total output tahunan akan mencapai 175.000 ton metrik nikel dan kobalt, yang setara dengan produksi tahunan sebesar 23,275 juta ton metrik tailing.



Gambar 24. Di dalam Kawasan Industri Morowali Indonesia (IMIP), hanya tiga fasilitas penyimpanan tailing yang difilter yang telah diidentifikasi lokasinya, yaitu fasilitas tailing untuk PT Qing Mei Bang (QMB) New Energy Materials, PT Huayue Nickel Cobalt (HYNC), dan satu perusahaan yang tidak diketahui. Ketiga fasilitas tersebut menempati area yang jauh lebih kecil dari total luas 600 hektare (6 kilometer persegi) seluruh fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di IMIP (lihat Tabel 4). Jika terjadi keruntuhan pada salah satu dari tiga fasilitas tersebut, tailing dapat mengalir ke Sungai Bahodopi (lihat gambar dengan skala lebih kecil dan jalur aliran tailing pada Gambar 41a–b). Lokasi fasilitas penyimpanan tailing yang difilter untuk PT HYNC dan PT QMB dikenal secara lokal sebagai KM8 atau IMIP8. Tidak sepenuhnya jelas apakah fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT HYNC dan PT QMB benar-benar merupakan fasilitas yang terpisah (lihat Gambar 40a dan 42a). PT BDM (Bintang Delapan Mineral) dan PT FMI (Fajar Metal Industry) bukanlah proyek HPAL. PT BDM adalah perusahaan tambang bijih nikel, sementara PT FMI memproduksi nikel sulfida untuk baterai listrik. Latar belakang merupakan citra Google Earth tanggal 7 Januari 2020 dan 3 Januari 2025. Versi peta dalam Bahasa Indonesia tersedia di Yayasan Tanah Merdeka (YTM) (2025b).

Informasi paling sedikit tersedia mengenai fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Kawasan Industri Weda Bay di Pulau Halmahera, bahkan lokasi fasilitas tailing tersebut pun tidak diketahui. Mecater Ingénierie (2023a) melaporkan kontrak untuk merancang fasilitas penyimpanan tailing yang difilter dengan kapasitas tailing sebesar 66 juta ton metrik (lihat Tabel 4) untuk PT Huafei Nickel Cobalt (HFNC), satu-satunya proyek HPAL yang beroperasi di Kawasan Industri Weda Bay. Berdasarkan kapasitas tahunan sebesar 120.000 ton metrik nikel dan 15.000 ton metrik kobalt untuk PT HFNC (Nangoy, 2023; lihat Tabel 1a), serta rasio tailing terhadap logam sebesar 133, PT HFNC menghasilkan 17,9 juta ton metrik tailing per tahun (lihat Tabel 4), sehingga fasilitas penyimpanan tailing yang difilter tersebut akan penuh dalam waktu

kurang dari empat tahun. Maka dari itu, sebagaimana halnya di Kawasan Industri Morowali Indonesia, harus ada rencana untuk membangun beberapa fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Kawasan Industri Weda Bay, terutama mengingat bahwa proyek HPAL PT Blue Sparkling Energy (BSE) diperkirakan akan mulai berproduksi pada tahun 2026 dengan kapasitas maksimum sebesar 67.000 ton metrik nikel dan 7.500 ton metrik kobalt per tahun (Argus, 2024; IndoPremier, 2024; lihat Tabel 1b). Mecater Ingénierie (2023b) juga melaporkan kontrak untuk merancang fasilitas penyimpanan tailing yang difilter dengan kapasitas tailing sebesar 67 juta meter kubik untuk proyek HPAL Sonic Bay di Kawasan Industri Weda Bay, meskipun proyek Sonic Bay sejak saat itu telah dihentikan atau dibatalkan (lihat Tabel 4). Dengan asumsi kerapatan kering tailing yang dipadatkan sebesar 2,0 ton metrik per meter kubik (Cacciuttolo Vargas dan Pérez Campomanes, 2022) dan laju produksi tailing sebesar 10,35 juta ton metrik per tahun (Saputra et al., 2023), maka fasilitas tailing yang diusulkan tersebut akan penuh dalam waktu sedikit lebih dari tiga tahun. Kapasitas maksimum yang diusulkan sebesar 60.000 ton metrik nikel per tahun (IndoPremier, 2024; lihat Tabel 1d) dan rasio tailing terhadap logam sebesar 133 akan menghasilkan 8,0 juta ton metrik tailing per tahun, yang berarti fasilitas tailing tersebut akan penuh dalam waktu sedikit lebih dari empat tahun.

Satu-satunya fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Indonesia yang tidak menyimpan tailing dari proyek HPAL adalah fasilitas milik tambang emas Gosowong PT Nusa Halmahera Minerals (NHM) (Tampi, 2024), yang lokasinya tidak diketahui. Menurut Tampi (2024), “Selain reklamasi dan rehabilitasi, pihak PT NHM juga memperkuat pengelolaan limbah dan Bahan Berbahaya Beracun (B3) sebagai upaya penambangan hijau. Bahkan, pada Februari 2023, NHM telah meresmikan pabrik Dry Stack Tailing (DST) yang merupakan fasilitas pengolahan limbah yang ramah lingkungan pertama di Indonesia tanpa merkuri.” Dengan demikian, sebagaimana halnya tailing dari proyek HPAL, fasilitas penyimpanan tailing yang difilter dipandang sebagai komponen penting dari penambangan hijau. Referensi terhadap "tanpa merkuri" dalam Tampi (2024) tidak jelas. Selain itu, ketika fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang emas Gosowong PT NHM dibuka pada tahun 2023, fasilitas penyimpanan tailing yang difilter sudah ada untuk proyek PT HPL, PT HYNC, dan PT QMB (lihat Tabel 1a), sehingga klaim bahwa fasilitas tersebut merupakan “fasilitas pengolahan limbah yang ramah lingkungan pertama di Indonesia” juga tidak jelas. Menurut NHM Gosowong Gold Mine (2025), pabrik pengolahan bijih memiliki kapasitas tahunan sebesar 800.000 ton metrik kering. Oleh karena itu, laju produksi tahunan tailing emas dibatasi oleh dan kemungkinan mendekati 800.000 ton metrik, yang jauh lebih kecil dibandingkan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter untuk proyek HPAL (lihat Tabel 4).

Pemahaman mengenai teknologi tailing yang difilter di Indonesia terhambat oleh banyaknya informasi yang saling bertentangan antara dokumen perusahaan dan artikel media. Tabel-tabel proyek HPAL yang hanya mencantumkan nama, lokasi, kepemilikan, kapasitas tahunan, dan tahun operasi (lihat Tabel 1a–d) mengandalkan survei dari IndoPremier (2024) sebagai acuan utama, tetapi juga mencantumkan informasi alternatif dari sumber lain. Ketidaksesuaian terbesar terjadi pada kapasitas tahunan kobalt, dengan banyak sumber hanya mencantumkan kapasitas nikel tahunan, sehingga tidak jelas apakah sumber tersebut bermaksud menyatakan bahwa tidak ada atau tidak akan ada produksi kobalt. Sayangnya, informasi yang bertentangan ditemukan bahkan dalam dokumen dari satu perusahaan yang sama, terutama pada fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT Halmahera Persada Lygend (HPL) di Pulau Obi, yang merupakan satu-satunya fasilitas tailing di Indonesia yang memiliki informasi rinci.

Sebagai contoh, PT Halmahera Persada Lygend (2024) menyatakan bahwa 7.496.050 ton metrik tailing dihasilkan oleh PT HPL pada tahun 2023 (sesuai dengan data dari PT Trimegah Bangun Persada (2023a)), dan juga bahwa "hingga Desember 2023, sebanyak 5,7 juta ton tailing telah disimpan di DSTF [Dry Stack Tailings Facility]". Jumlah total produksi tailing untuk tahun 2023 ini sama persis dengan yang dinyatakan oleh PT Trimegah Bangun Persada (2023a), yang juga menyatakan bahwa "sejak awal operasi PT HPL ... 100% tailing dikirim ke fasilitas dry stack tailing (DSTF)." Sebagai contoh kedua, PT Halmahera Persada Lygend (2024) menyatakan kapasitas penyimpanan maksimum DSTF sebesar 57,2 juta ton metrik, tetapi juga bahwa 28.399.985 dan 28.862.204 ton metrik tailing saat ini disimpan, masing-masing di bagian P23 dan bagian P89 (kemungkinan besar maksudnya adalah gabungan bagian P-08 dan P-09) (lihat Gambar 21). Laporan ini tidak berusaha mendokumentasikan seluruh informasi yang bertentangan. Dalam semua kasus, nilai yang dianggap paling akurat adalah nilai yang paling sering dinyatakan dan paling konsisten dengan nilai dalam sumber yang sama maupun dengan sumber lain (lihat Tabel 4). Kemungkinan bahwa Dry Stack Tailings Facility (DSTF) bukan satu-satunya fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT HPL akan dibahas lebih lanjut dalam bagian "Pulau Obi: Kegagalan Katastropik yang Tak Terelakkan".

BATAS TEKNOLOGI SAAT INI UNTUK TAILING YANG DIFILTER

Tujuan dari bagian ini adalah untuk menempatkan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Indonesia dalam konteks global, terutama dalam hal batas teknologi saat ini untuk tailing yang difilter. Karena curah hujan yang tinggi cenderung membuat tailing yang difilter kembali jenuh, maka tingkat curah hujan menjadi kendala utama terhadap tinggi, volume penyimpanan, dan laju pemrosesan (laju produksi tailing) dari fasilitas penyimpanan tailing yang difilter. Batas teknologi saat ini untuk fasilitas penyimpanan tailing yang difilter ditentukan dengan mengumpulkan data dari 84 fasilitas tailing yang difilter dengan ketinggian dan volume penyimpanan yang diketahui, serta 23 fasilitas dengan laju pemrosesan yang diketahui (Klohn Crippen Berger, 2017; Franks et al., 2021; Cacciuttolo Vargas dan Pérez Campomanes, 2022; UNEP et al., 2025; lihat Tabel 6a-b). Untuk semua lokasi fasilitas tailing, rerata curah hujan tahunan ditentukan dari model iklim yang dikembangkan oleh Fick dan Hijmans (2017) dengan resolusi spasial satu kilometer (lihat Tabel 6a-b). Informasi lebih lanjut tentang pentingnya batas teknologi saat ini dapat dirujuk dalam Russell et al. (2024) dan Emerman (2024).

Batas teknologi saat ini untuk volume penyimpanan ditentukan oleh garis yang menghubungkan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang La Coipa di Chili dengan volume penyimpanan tailing sebesar 71 juta meter kubik dan rerata curah hujan tahunan sebesar 43 mm, serta fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang COMILOG di Gabon dengan volume penyimpanan tailing sebesar 8,6 juta meter kubik dan rerata curah hujan tahunan sebesar 1.779 mm (lihat Gambar 25a). Dapat dengan mudah dilihat bahwa fasilitas penyimpanan tailing yang difilter dengan volume penyimpanan besar hanya ditemukan di tambang-tambang yang berada di iklim kering atau semi-kering, seperti tambang Orapa dan Jwaneng di Botswana, yang memiliki rerata curah hujan tahunan masing-masing sebesar 307 mm dan 357 mm (lihat Tabel 6a dan Gambar 25a). Bahkan, volume penyimpanan tailing terbesar di iklim yang tergolong agak basah hanya ditemukan di tambang Khwezela di Afrika Selatan dengan volume penyimpanan sebesar 13,1 juta meter kubik dan rerata curah hujan tahunan sebesar 685 mm, serta tambang Alamo Dorado di Meksiko dengan volume penyimpanan sebesar 11,5 juta meter kubik dan rerata curah hujan tahunan sebesar 711 mm (lihat Tabel 6a dan Gambar 25a). Kegagalan fasilitas

penyimpanan tailing yang difilter di tambang Pau Branco dan Turmalina di Brasil telah dibahas sebelumnya (lihat Gambar 14, 15a-b, dan 17). Fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang Pinos Altos di Meksiko juga dilaporkan dalam kondisi tidak stabil meskipun tanpa informasi lebih lanjut (Franks et al., 2021; UNEP et al., 2025). Dengan menggunakan rerata curah hujan tahunan masing-masing sebesar 1.597 mm, 1.360 mm, dan 1.046 mm (Fick dan Hijmans, 2017), serta volume penyimpanan tailing masing-masing sebesar 2,85 juta, 0,71 juta, dan 5,152 juta meter kubik (Agência Nacional de Mineração, 2025; UNEP et al., 2025) untuk fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang Pau Branco, Turmalina, dan Pinos Altos, dapat disimpulkan bahwa pembangunan fasilitas bahkan jauh di bawah batas teknologi saat ini tidak menjamin keberhasilan (lihat Gambar 25a).

Tabel 6a. Fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di luar Indonesia dengan ketinggian dan volume penyimpanan yang diketahui[1]

Negara	Tambang	Fasilitas Penyimpanan Tailing yang Difilter	Ketinggian (m)	Volume Penyimpanan (Mm^3)	Rerata Curah Hujan (mm)[2]
Australia	Gove[3]	Pond 3	29	9.6	1313
Australia	Gove[3]	Pond 4	42	10.33	1313
Botswana	Damtshaa	Damtshaa CRD	56	12	311
Botswana	Jwaneng	Jwaneng JMP CRD	17	0.3	358
Botswana	Jwaneng	Jwaneng RP CRD	35	37.5	357
Botswana	Letlhakane	Letlhakane -LTP CRD	22	5	324
Botswana	Orapa	Orapa Plant 1 CRD	73	52.4	307
Botswana	Orapa	Orapa Plant 2 CRD	68	11.9	306
Brasil	Barro Alto	Slag Pile No. 1	80	7.4	1465
Brasil	Codemin	Codemin: Slag Pile No. 1	45	3.5	1517
Brasil	Codemin	Codemin: Slag Pile No. 2	60	3.8	1517
Brasil	Serra Azul	Serra Azul Dry Stack	64	3.08	1571
Kanada	Caribou	TSF 2 Anaconda	11	0.165	1136
Kanada	CEZinc Processing Plant	Ferrite (West)	3	3	989
Kanada	Gahcho Kue	Gahcho Kue Course PKC Pile	20	2.9	297
Kanada	Meliadine[3]	Meliadine TSF	5	0.089	306
Kanada	Raglan Mine	Raglan (Tailings Dry Stack)	35	11	447
Kanada	Sorel-Tracy	P84	33	3.28533	990
Kanada	Victor	Victor Coarse PK & Lo rade Ore Stockpile	12	5.94	615

Kanada	Victor	Victor Coarse PK & overburden Stockpile	14	5.4	612
Chili	Chagres	Chagres Slag Heap	25	0.861435	311
Chili	El Indio	Dry Stack TSFs 1,2 and 3	215	2.8	152
Chili	La Coipa	La Coipa	200	71	43
Perancis	Montgrand	Montgrand 0128	15	0.65	589
Gabon	COMILOG	COMILOG CIM	30	8.6	1779
Guatemala	Escobal	Escobal	42	1.5	1543
Kirgistan	Bozymchak	Bozymchak	35	2	527
Meksiko	Alamo Dorado	Alamo Dorado	60	11.5	711
Meksiko	Pinos Altos[3]	Pinos Altos TMF	105	5.152	1047
Meksiko	San Jose Mine	Cuzcatlan Dry Stack	22.5	1.157847	680
Namibia	Orange River	Auchas CRD	64	5.2	51
Namibia	Orange River	Daberas DTP CRD	68	11.2	37
Namibia	Orange River	Daberas OTP CRD	57	8.8	39
Namibia	Orange River	Sendelingsdrif CRD - TD1	55	0.3	33
Namibia	Southern Coastal	1 Plant CRD	46	3.3	48
Namibia	Southern Coastal	2 Plant CRD	65	10.9	43
Namibia	Southern Coastal	3 Plant CRD	59	3.6	52
Namibia	Southern Coastal	4 Plant CRD	72	10.1	49
Namibia	Southern Coastal	Elizabeth Bay CRD	66	6.5	17
Namibia	Southern Coastal	PTF CRD	49	6	53
Peru	Tombomayo[3]	Relavera 1	20	0.8	570
Rusia	Amursk	Amursk DSF	—	1.7454	583
Rusia	Kupol Gold Mine	Kupol Dry Stack TSF	23	2.2	315
Rusia	Voro	Voro DSF	—	—	495
Arab Saudi	Jabal Sayid	Dry Stack TSF	28	2.4	100
Afrika Selatan	Goedehoop	Klein Shaft	14	0.5	696
Afrika Selatan	Goedehoop	Old Springbok No.1	39	2.5	686
Afrika Selatan	Goedehoop	Old Springbok No.2	13	1.25	674
Afrika Selatan	Goedehoop	Schoonie Dump	31	0.7	690
Afrika Selatan	Greenside	Clydesdale Dump	10	0.1	695
Afrika Selatan	Ingagane	Ingagane No. 1	18	0.51	788
Afrika Selatan	Ingagane	Ingagane No. 2	8	0.1	788

Afrika Selatan	Khwezela	Anglo French	22	0.18	696
Afrika Selatan	Khwezela	Kleinkopje Dump/Roof Coal Dump combined	46	13.1	685
Afrika Selatan	Khwezela	Klipfontein Dump	45	10	697
Afrika Selatan	Khwezela	Landau 1 Dump	2	0.2	700
Afrika Selatan	Khwezela	Landau 2 Dump	24	2	701
Afrika Selatan	Khwezela	Old Navigation Dump	36	5.7	700
Afrika Selatan	Mafube	Mafube De-watered Fines Dump	25	4.5	709
Afrika Selatan	Mafube	Mafube Discards Dump	30	3.84	709
Afrika Selatan	Middelburg Steam & Station Colliery	No. 2 Dump	20	0.4	704
Afrika Selatan	Middelburg Steam & Station Colliery	Presentation Dump	10	0.2	701
Afrika Selatan	Mortimer	Mortimer Slag Stockpile	28	1.6	613
Afrika Selatan	Namaqualand	Namaqualand AK3 CRD	51	11.1	96
Afrika Selatan	Namaqualand	Namaqualand Bulk Sample CRD	34	2.6	83
Afrika Selatan	Namaqualand	Namaqualand Tweepad CRD	66	16	77
Afrika Selatan	Natal Anthracite Colliery	Boschhoek	42	0.7	864
Afrika Selatan	Polokwane	Polokwane Slag Stockpile	38	3.3	703
Afrika Selatan	Venetia	Venetia CRD	42	16.4	359
Afrika Selatan	Voorspoed	Voorspoed CRD	40	9	615
Afrika Selatan	Vryheid Coronation Colliery	No. 1 Dump	20	1.25	860
Afrika Selatan	Vryheid Coronation Colliery	No. 2 Dump	40	1.25	861

Afrika Selatan	Vryheid Coronation Colliery	No. 3 Dump	36	1.7	864
Afrika Selatan	Vryheid Coronation Colliery	No. 4 Dump	20	3.75	866
Spanyol	N/A	Cobre Las Cruces TSF	35	7.076	522
AS	Greens Creek	Greens Creek	109	3.89	1760
AS	Idarado	Red Mountain #1	15	0.04	806
AS	Idarado	Red Mountain #2	20	0.1	806
AS	Idarado	Red Mountain #3	15	0.1	806
AS	Idarado	Red Mountain #4	15	1.5	806
AS	Idarado	Red Mountain Buried Tailings	30		806
AS	Idarado	Telluride Tailings Pile 1-4	13	0.22	806
AS	Idarado	Telluride Tailings Pile 5-6	30	9.5	806
Zimbabwe	Unki	Unki Slag Stockpile	—	0.01	695

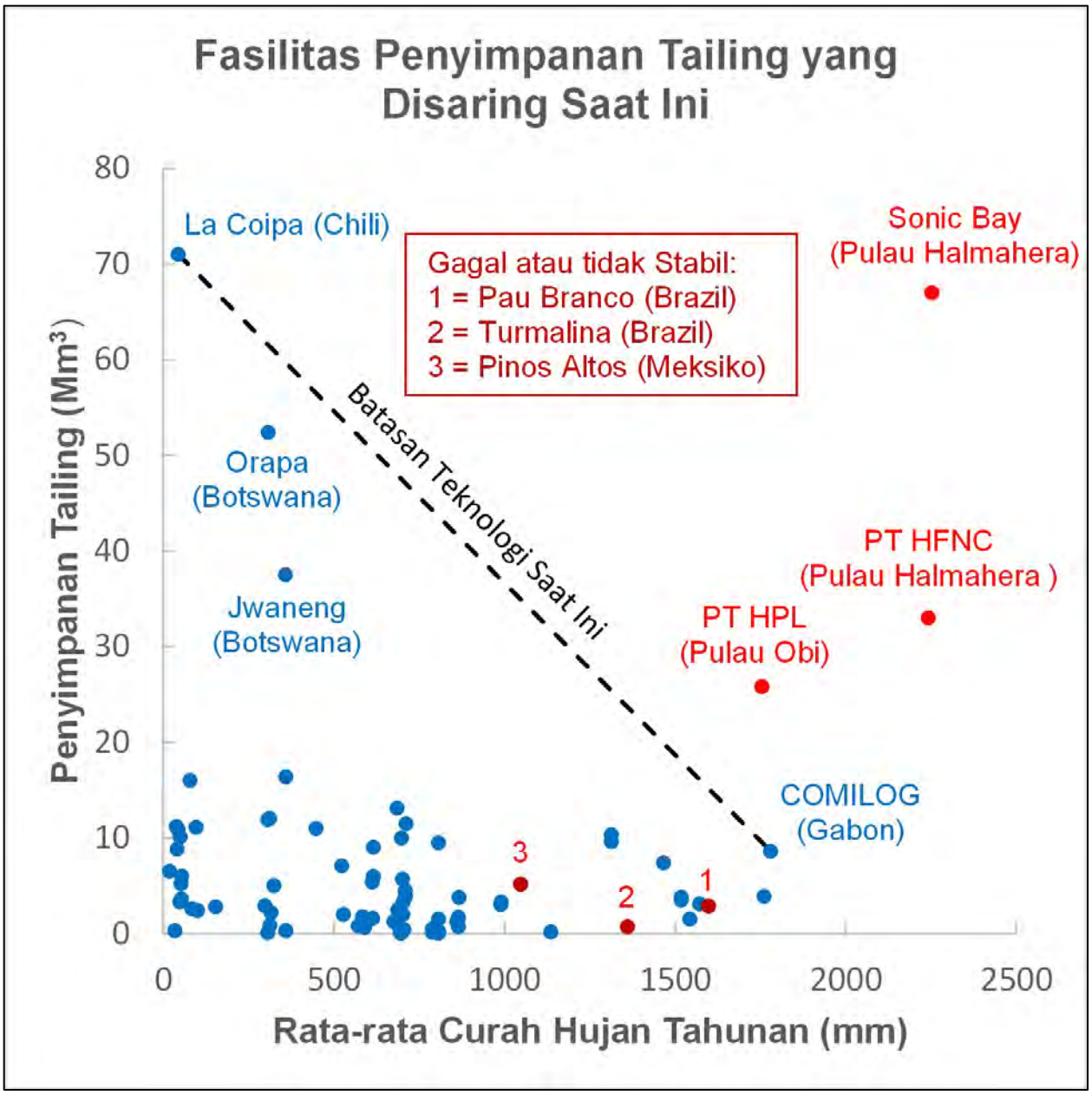
[1]Semua data berasal dari UNEP et al. (2025) kecuali jika dinyatakan lain.
[2]Rerata curah hujan diperkirakan dengan membandingkan lintang dan bujur dalam UNEP et al. (2025) dengan Fick dan Hijmans (2017).
[3]Data berasal dari Franks et al. (2021).

Tabel 6b. Fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di luar Indonesia dengan laju produksi tailing yang diketahui

Tambang	Negara	Rerata Produksi Tailing (ton metrik per hari)		Rerata Curah Hujan[1] (mm)
		2017[2]	2022[3]	
Alamo Dorado	Meksiko	4000	3500	800
Bellekeno	Kanada	188	—	280
Catalina Huanca	Peru	2000	1850	854
Cerro Lindo	Peru	6480	5000	200
Efemçukuru	Turki	700	1500	740
El Indio	Chili		3000	12
El Peñon	Chili	4200	3500	50
El Sauzal	Meksiko	5770	5300	800
El Toqui	Chili	1725	—	1480
Éléonore	Kanada	4000	—	720
Escobal	Guatemala	1528	—	1689
Gold Road	AS	500	—	261
Greens Creek	AS	750	1500	1450
Karara	Australia	35000	50000	310
La Coipa	Chili	18000	20000	9
Mantos Blancos	Chili	12000	12000	50

Marlin	Guatemala	6000	—	1136
Meliadine	Kanada	5000	—	412
Minto	Kanada	3800	—	250
Pogo	AS	1360	2500	356
Raglan	Kanada	3520	—	520
San Dimas	Meksiko	2500	—	87
Skorpion Zinc	Namibia	5040	—	20

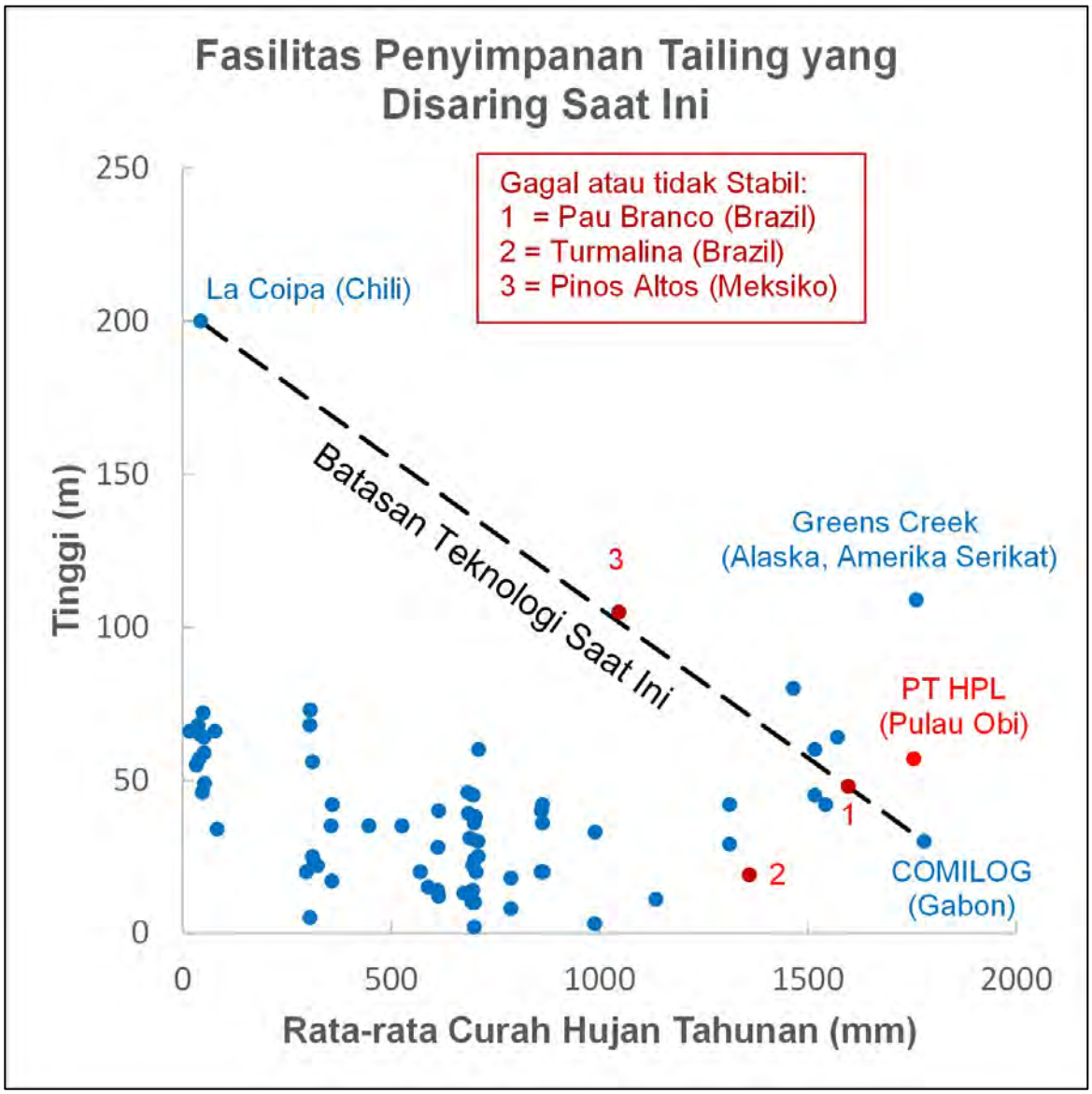
[1]Data dari Klohn Crippen Berger (2017), Fick dan Hijmans (2017), dan Cacciuttolo Vargas dan Pérez Campomanes (2022)
[2]Data dari Klohn Crippen Berger (2017)
[3]Data dari Cacciuttolo Vargas dan Pérez Campomanes (2022)



Gambar 25a. Keterbatasan utama dalam ukuran fasilitas penyimpanan tailing yang difilter adalah dampak dari curah hujan. Batas kemampuan teknologi saat ini dapat digambarkan dengan menarik garis yang menghubungkan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang La Coipa di Chili dengan volume penyimpanan tailing sebesar 71 juta meter kubik dan rerata curah hujan tahunan sebesar 43 mm, dan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang COMILOG di Gabon dengan volume penyimpanan tailing sebesar 8,6 juta meter kubik dan rerata curah hujan tahunan sebesar 1779 mm. Rerata curah hujan tahunan sebesar 2252, 2241, dan 1754 mm, serta volume penyimpanan tailing masing-masing sebesar 67, 33, dan 25,8 juta meter kubik untuk fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di proyek Sonic Bay, PT HFNC, dan PT HPL (lihat Tabel 4), menempatkan ketiga fasilitas tersebut jauh di luar batas kemampuan teknologi saat ini. Rerata curah hujan tahunan sebesar 1597, 1360, dan 1046 mm, serta volume penyimpanan tailing masing-masing sebesar 2,85, 0,71, dan 5,152 juta meter kubik untuk fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang Pau Branco, Turmalina, dan Pinos Altos menunjukkan bahwa pembangunan di dalam batas kemampuan teknologi saat ini pun tidak menjamin keberhasilan. Data fasilitas penyimpanan tailing yang difilter diperoleh dari Franks et al. (2021), UNEP et al. (2025), dan Agência Nacional de Mineração (2025), sedangkan rerata curah hujan tahunan diperoleh dari Fick dan Hijmans (2017).

Model dari Fick dan Hijmans (2017) juga digunakan untuk menentukan rerata curah hujan tahunan sebesar 2252, 2241, dan 1754 mm di lokasi fasilitas penyimpanan tailing yang difilter pada proyek Sonic Bay, PT HFNC, dan PT HPL. Lokasi pasti fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Pulau Halmahera (PT HFNC dan Sonic Bay) sebenarnya tidak diketahui secara pasti, namun rerata curah hujan tahunan tersebut dihitung berdasarkan estimasi terbaik dari staf di Survival International. Jika rerata curah hujan tahunan ini dikombinasikan dengan volume penyimpanan tailing masing-masing sebesar 67, 33, dan 25,8 juta meter kubik untuk fasilitas di proyek Sonic Bay, PT HFNC, dan PT HPL (lihat Tabel 4), maka ketiga fasilitas tersebut berada jauh di luar batas kemampuan teknologi saat ini (lihat Gambar 25a). Penetapan volume penyimpanan sebesar 33 juta meter kubik untuk fasilitas tailing di proyek PT HFNC didasarkan pada asumsi kepadatan kering tailing yang dipadatkan sebesar 2,0 ton metrik per meter kubik (lihat Tabel 4). Hal yang sangat penting untuk dicatat adalah bahwa lokasi dua proyek di Pulau Halmahera memiliki rerata curah hujan tahunan yang jauh melampaui curah hujan di fasilitas penyimpanan tailing yang difilter manapun yang telah ada, di mana lokasi terbasah saat ini adalah tambang COMILOG di Gabon dengan rerata curah hujan tahunan sebesar 1779 mm (lihat Gambar 25a).

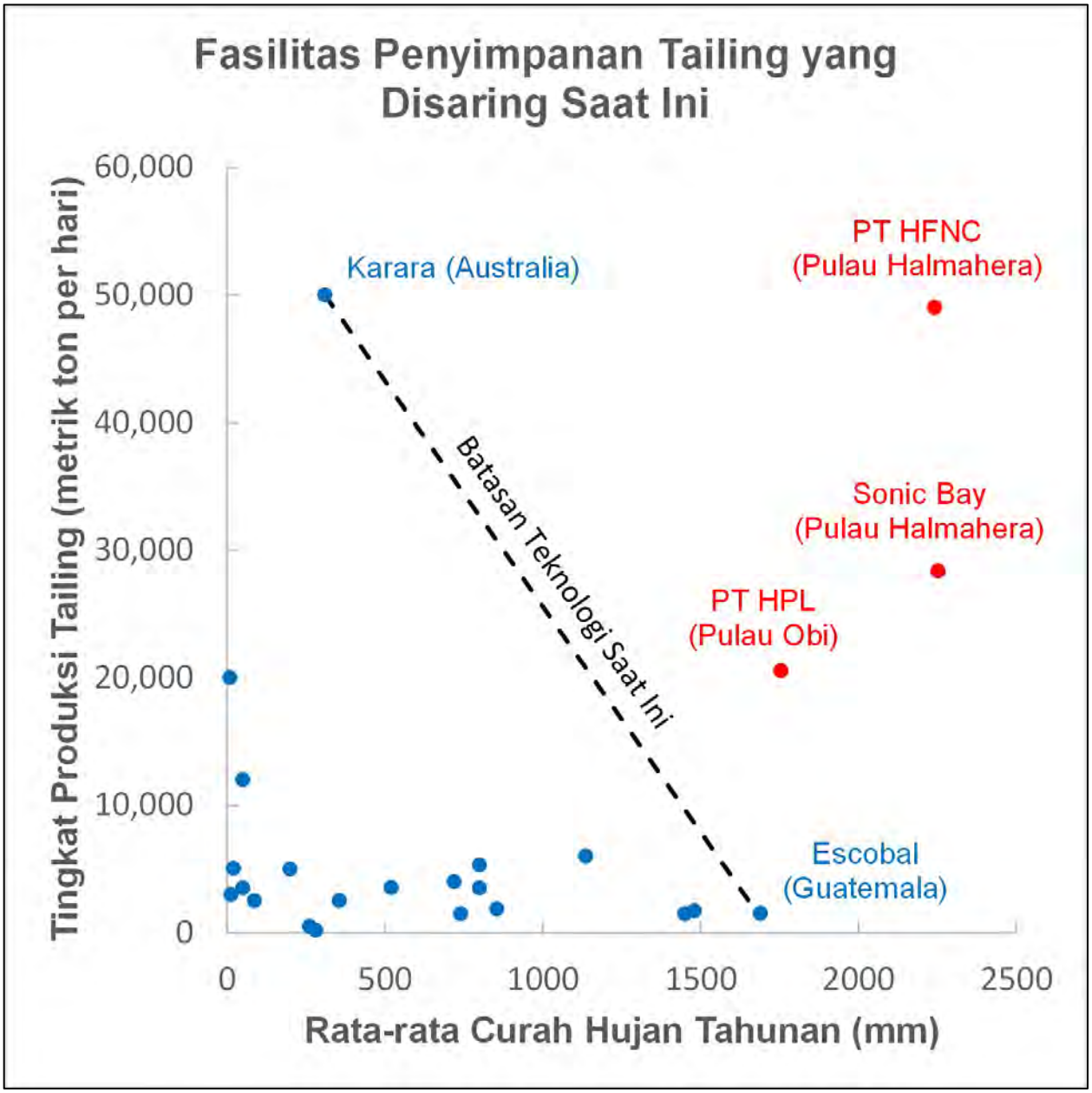
Dengan cara yang serupa, batas kemampuan teknologi saat ini untuk ketinggian dapat digambarkan dengan menarik garis yang menghubungkan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di La Coipa dengan ketinggian 200 meter dan rerata curah hujan tahunan sebesar 43 mm, serta fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di COMILOG dengan ketinggian 30 meter dan rerata curah hujan tahunan sebesar 1779 mm (lihat Gambar 25b). Meskipun fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang Greens Creek di Alaska memiliki ketinggian 109 meter pada rerata curah hujan tahunan sebesar 1760 mm (lihat Tabel 6a), laju produksinya (throughput) hanya 1500 ton metrik per hari (lihat Tabel 6b). Oleh karena itu, keberhasilan fasilitas Greens Creek kemungkinan tidak relevan dengan proyek Sonic Bay, PT HFNC, dan PT HPL, yang memiliki laju produksi masing-masing sebesar 28.356, 49.041, dan 20.537 ton metrik per hari (lihat Tabel 4). Menarik bahwa dengan rerata curah hujan tahunan sebesar 1597, 1360, dan 1046 mm (Fick dan Hijmans, 2017), dan ketinggian masing-masing sebesar 48, 19, dan 105 meter untuk fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang Pau Branco, Turmalina, dan Pinos Altos (Agência Nacional de Mineração, 2025; UNEP et al., 2025), maka ketinggian fasilitas Pau Branco dan Pinos Altos kurang lebih berada di batas kemampuan teknologi saat ini, walaupun ketinggian fasilitas Turmalina jauh di bawah batas tersebut. Dalam hal ini, rerata curah hujan tahunan sebesar 1754 mm dan ketinggian sebesar 57 meter untuk fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang PT HPL (lihat Tabel 4) menunjukkan bahwa ketinggian fasilitas tersebut berada 25 meter di atas batas kemampuan teknologi saat ini (lihat Gambar 25b). Sayangnya, Fasilitas Penyimpanan Tailing Kering (DSTF) pada proyek PT HPL adalah satu-satunya fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Indonesia dengan ketinggian maksimum yang diketahui.



Gambar 25b. Saat ini, keterbatasan utama terkait ukuran fasilitas penyimpanan tailing yang difilter adalah dampak dari curah hujan. Oleh karena itu, batas kemampuan teknologi saat ini kurang lebih dapat digambarkan dengan menarik garis yang menghubungkan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di La Coipa, Chili, dengan ketinggian 200 meter dan rerata curah hujan tahunan sebesar 43 mm, dan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di COMILOG, Gabon, dengan ketinggian 30 meter dan rerata curah hujan tahunan sebesar 1779 mm. Ketinggian fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang Greens Creek tidak relevan karena laju produksi tailingnya hanya 750 ton metrik per hari, yang kemudian meningkat menjadi 1500 ton metrik per hari pada tahun 2022 (lihat Tabel 6b), dibandingkan dengan laju produksi yang direncanakan sebesar 20.537 ton metrik per hari di tambang PT HPL (lihat Tabel 4). Rerata curah hujan tahunan sebesar 1754 mm dan ketinggian 57 meter untuk fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang PT HPL (lihat Tabel 1a) menempatkan ketinggian fasilitas tersebut 25 meter di atas batas kemampuan teknologi saat ini. Rerata curah hujan tahunan sebesar 1597, 1360, dan 1046 mm, serta ketinggian masing-masing sebesar 48, 19, dan 105 meter untuk fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang Pau Branco, Turmalina, dan Pinos Altos menunjukkan bahwa ketinggian fasilitas Pau Branco dan Pinos Altos kurang lebih berada di batas kemampuan teknologi saat ini, sementara ketinggian fasilitas Turmalina jauh di bawah batas tersebut. Data tentang fasilitas penyimpanan tailing yang difilter diperoleh dari Franks et al. (2021), UNEP et al. (2025), dan Agência Nacional de Mineração (2025), sedangkan data rerata curah hujan tahunan diperoleh dari Fick dan Hijmans (2017).

Akhirnya, batas kemampuan teknologi saat ini untuk laju produksi tailing ditentukan oleh garis yang menghubungkan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Karara, Australia, dengan laju produksi tailing sebesar 50.000 ton metrik per hari dan rerata curah hujan tahunan sebesar 310 mm, dan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Escobal, Guatemala, dengan laju produksi tailing sebesar 1528 ton metrik per hari dan rerata curah hujan tahunan sebesar 1689 mm (lihat Gambar 25c). Sampai saat ini, laju produksi tailing tertinggi yang diketahui di iklim basah terjadi di tambang Marlin di Guatemala dengan laju produksi sebesar 6000 ton metrik per hari dan rerata curah hujan tahunan sebesar 1136 mm (lihat Tabel 6b). Menggunakan rerata curah hujan tahunan sebesar 2252, 2241, dan 1754 mm, serta laju produksi tailing masing-masing sebesar 28.356, 49.041, dan 20.537 ton metrik per hari untuk fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di proyek Sonic Bay, PT HFNC, dan PT HPL (lihat Tabel 4), maka ketiga fasilitas tersebut jelas berada jauh di luar batas kemampuan teknologi saat ini (lihat Gambar 25c). Singkatnya, proyek Sonic Bay, PT HFNC, dan PT HPL semuanya berada jauh di luar batas kemampuan teknologi saat ini dalam hal volume penyimpanan, ketinggian, dan laju produksi tailing untuk tingkat curah hujan tertentu.

Dapat dikatakan bahwa penilaian terhadap batas kemampuan teknologi saat ini untuk volume penyimpanan, ketinggian, dan laju produksi tailing (lihat Gambar 25a–c) belum sepenuhnya didasarkan pada data terbaru. Meskipun sebagian besar data mengenai volume penyimpanan dan ketinggian berasal dari basis data yang dikelola oleh UNEP et al. (2025), beberapa entri belum diperbarui sejak tahun 2020, dan basis data tersebut tidak menjelaskan kapan terakhir kali data diperbarui. Selain itu, belum ada kompilasi laju produksi tailing yang difilter sejak ulasan oleh Cacciuttolo Vargas dan Pérez Campomanes (2022). Oleh karena itu, ada kemungkinan bahwa sejumlah fasilitas penyimpanan tailing yang difilter berskala besar telah muncul di iklim basah dalam beberapa tahun terakhir dan luput dari perhatian penulis. Namun, kemunculan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter berskala besar di iklim basah tidak serta merta menjamin keberhasilannya karena komunitas spesialis tailing memerlukan waktu untuk mempelajari keberhasilan dan kegagalan fasilitas-fasilitas tersebut. Namun demikian, dapat dipertanyakan sejauh mana pengetahuan benar-benar dibagikan di antara para spesialis tailing, mengingat minimnya informasi yang tersedia secara publik tentang fasilitas penyimpanan tailing yang difilter. Secara khusus, belum ada analisis yang tersedia untuk publik mengenai penyebab dan pelajaran yang dapat diambil dari kegagalan baru-baru ini di fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang Pau Branco atau Turmalina di Brasil, maupun dari kegagalan dan ketidakstabilan yang dilaporkan di fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di tambang Cuzcatlán dan Pinos Altos di Meksiko. Mengenai kegagalan untuk belajar ini, laporan ini sekarang beralih pada bahaya kegagalan bencana yang mengancam dari fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik proyek PT Halmahera Persada Lygend (HPL) di Pulau Obi.



Gambar 25c. Saat ini, keterbatasan utama terkait ukuran timbunan tailing yang difilter adalah dampak dari curah hujan. Oleh karena itu, batas kemampuan teknologi saat ini ditentukan oleh garis yang menghubungkan timbunan tailing yang difilter di Karara, Australia, dengan laju produksi tailing sebesar 50.000 ton metrik per hari dan rerata curah hujan tahunan sebesar 310 mm, dan timbunan tailing yang difilter di Escobal, Guatemala, dengan laju produksi tailing sebesar 1528 ton metrik per hari dan rerata curah hujan tahunan sebesar 1689 mm. Rerata curah hujan tahunan sebesar 2252, 2241, dan 1754 mm, serta laju produksi tailing masing-masing sebesar 28.356, 49.041, dan 20.537 ton metrik per hari untuk fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di proyek Sonic Bay, PT HFNC, dan PT HPL (lihat Tabel 4), menempatkan ketiga fasilitas tersebut jauh di luar batas kemampuan teknologi saat ini. Data tentang timbunan tailing yang difilter diperoleh dari Klohn Crippen Berger (2017) dan Cacciuttolo Vargas dan Pérez Campomanes (2022). Rerata curah hujan tahunan diperoleh dari Klohn Crippen Berger (2017), Fick dan Hijmans (2017), dan Cacciuttolo Vargas dan Pérez Campomanes (2022).

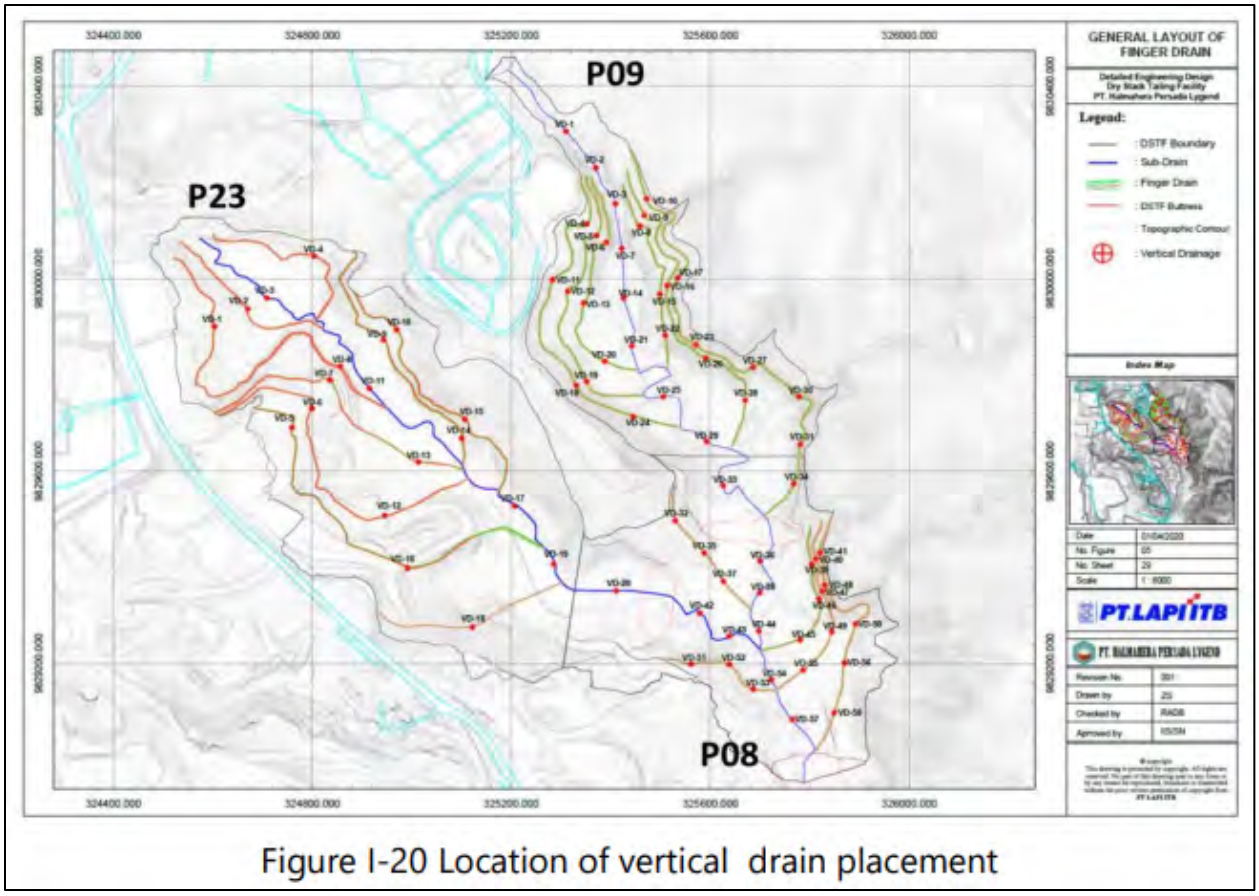
PULAU OBI: ANCAMAN KERUNTUHAN KATASTROFIK YANG NYATA

Kontaminasi Air Tanah

Pada bulan Desember 2022, SRK Consulting menyerahkan laporan konsultasi tentang proyek PT HPL di Pulau Obi yang berjudul *"Final—Independent Technical Assessment Report on the Mineral Assets of PT Trimegah Bangun Persada, Indonesia—Project Green ITAR, Obi Island, Sulawesi, Indonesia"* (SRK Consulting, 2022a). Laporan ini telah mengalami sembilan revisi besar dengan sejumlah revisi kecil seperti Revisi 7A, 7B, 7C, 7D, dan 7E. Menurut SRK Consulting (2022a), "SRK diberitahu bahwa pemantauan kadar kelembapan fasilitas tailing yang difilter, kualitas air tanah, dan kualitas lindi dilakukan setiap bulan dan dilaporkan setiap 3 bulan … Beberapa indikator kualitas air tanah melebihi ambang standar (B, Ni, Cr6+)." SRK Consulting (2022a) mengidentifikasi adanya kekurangan dalam desain dan konstruksi, namun tidak secara langsung mengaitkan kekurangan tersebut dengan kontaminasi air tanah. Menurut SRK Consulting (2022a), "Gambar 7-10 (Lapi ITB, 2022) [lihat Gambar 26 dalam laporan ini] menunjukkan rencana drainase, tetapi arah aliran pembuangan dari saluran P 23-SE dan P09-SW yang menjauh dari fasilitas tailing yang difilter tidak jelas. Juga dicatat bahwa sebagian infrastruktur drainase masih dalam tahap konstruksi … Kolam pengolahan air dalam kondisi buruk dan beberapa area masih dalam tahap pembangunan."

Dalam sebuah tabel yang berjudul "Analisis risiko untuk fasilitas tailing yang difilter dari HPAL," SRK Consulting (2022a) mengidentifikasi "Penilaian potensi logam untuk terlarut kembali dan meresap ke dalam tanah alami" sebagai sebuah "Kesenjangan/Risiko" dengan "Dampak yang Mungkin Terjadi" berupa "Kemungkinan kontaminasi terhadap tanah alami." Satu-satunya "Mitigasi" yang direkomendasikan oleh SRK Consulting (2022a) adalah "Menyelidiki potensi kelarutan logam ke dalam tanah alami." Studi terhadap potensi pelindian logam dari tailing HPAL tentu tidak dapat dianggap sebagai tindakan pencegahan (mitigasi) terhadap kontaminasi air tanah, maupun sebagai langkah remediasi atas kontaminasi air tanah yang sudah diketahui terjadi. Dalam pengertian tertentu, rekomendasi ini justru menyiratkan penerimaan bahwa kontaminasi air tanah akan terjadi apabila tailing memiliki potensi untuk melindikan logam.

Dengan cara yang serupa, Revisi 1 mengidentifikasi "Penilaian geokimia limbah dan potensi pembentukan asam (PAF) serta aliran asam yang dihasilkan diperlukan" dalam kategori "Kesenjangan/Risiko" dengan "Dampak yang Mungkin Terjadi" berupa "Potensi aliran air asam ke badan air. Dampaknya akan bervariasi tergantung pada geokimia material tetapi membawa risiko kontaminasi lingkungan dan sanksi." Rekomendasi yang diberikan adalah "Menyelidiki geokimia dan potensi pengasaman dari limbah terak dan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter" (SRK Consulting, 2022b). Rekomendasi untuk menyelidiki potensi pembentukan air asam tambang tetap muncul dalam pembaruan minor berikutnya (SRK Consulting, 2022c), namun telah hilang pada Revisi 2 (SRK Consulting, 2022d). Namun demikian, apakah tailing tersebut berpotensi menghasilkan asam belum juga terselesaikan hingga penyampaian Revisi 9 terakhir, karena Revisi 9 menyatakan bahwa "Material belum diklasifikasikan berdasarkan potensi untuk menghasilkan aliran air asam" (SRK Consulting, 2022a).



Gambar 26. Meskipun Fasilitas Tailing yang Difilter (*Dry Stack Tailings Facility*/DSTF) di tambang PT HPL telah beroperasi selama 1,5 tahun dari total masa operasional yang direncanakan selama enam tahun, SRK Consulting (2022a) mencatat bahwa infrastruktur drainasenya belum sepenuhnya selesai dibangun. Lebih lanjut, SRK Consulting (2022a) menyatakan bahwa mereka tidak dapat memahami bagaimana sistem drainase tersebut seharusnya berfungsi. Menurut SRK Consulting (2022a), "[Bagaimana] aliran pembuangan dari saluran P 23-SE dan P09-SW menjauh dari fasilitas tailing yang difilter tidak jelas. Juga dicatat bahwa sebagian infrastruktur drainase masih dalam tahap konstruksi." Gambar dari PT Lapi ITB (2022).

Dari pengungkapannya, terdapat kesan bahwa kontaminasi air tanah telah menjadi bagian dari desain Fasilitas Tailing yang Difilter (DSTF). Tidak satu pun dokumen yang tersedia mengenai DSTF (Hatch, 2020; PT Lapi ITB, 2020, 2022; SRK Consulting, 2022a) menyebutkan keberadaan sistem pelapis (*liner system*), yang seharusnya menjadi standar untuk mencegah kontaminasi air tanah, bersama dengan infrastruktur drainase yang sesuai baik di atas maupun di bawah sistem pelapis. Bahkan, PT Lapi ITB (2020) memperkirakan rerata kebocoran tahunan ke akuifer bawah permukaan sebesar 29.326 meter kubik per tahun dengan puncak harian sebesar 82,86 meter kubik per hari (lihat Gambar 27a-b). Menurut PT Lapi ITB (2020), "Pembentukan lindi terutama disebabkan oleh perkolasi air melalui tailing yang telah diendapkan. Setelah bersentuhan dengan tailing, air perkolasi menjadi terkontaminasi, dan jika kemudian mengalir keluar dari timbunan tailing, maka air tersebut disebut lindi." PT Lapi ITB (2020) juga memprediksi kenaikan muka air tanah di dalam DSTF sebesar 31 meter karena ketidakmampuan lindi dari DSTF untuk mengalir cukup cepat ke akuifer bawah tanah (lihat Gambar 28). Terakhir, PT Lapi ITB (2020) menghasilkan serangkaian peta yang memprediksi "Penyebaran

Kontaminan" pada 10 tahun, 50 tahun, dan 100 tahun setelah pembukaan DSTF (lihat Gambar 29a-c). Implikasi dari muka air tanah yang tinggi terhadap stabilitas fisik dan potensi likuifaksi dari DSTF akan dibahas lebih lanjut dalam subbagian berikutnya.

Table III-10 Estimated Annual Average and Daily Peaks Leachate Quantity

DSTF	Parameters	Annual Average		Peaks Daily	
		mm/year	m^3/year	mm/day	m^3/day
P23	Precipitation	3,024.06	1,463,341.60	861.1	416,686.28
	Estimation Drainage collected	562.34	272,117.34	4.28	2071.60
	Estimation Leakege to Aquifer	30.94	14,974.89	0.08	42.27
P09	Precipitation	3,024.06	793,210.00	861.1	225,866.51

Gambar 27a. Sebuah laporan konsultasi oleh PT Lapi ITB memperkirakan bahwa 14.975 meter kubik air yang berpotensi terkontaminasi akan meresap setiap tahun dari bagian P23 (lihat Gambar 21) dari Fasilitas Tailing yang Difilter (*Dry Stack Tailings Facility*/DSTF) di tambang PT HPL ke dalam akuifer bawah tanah. Dengan demikian, potensi kontaminasi air tanah tampaknya telah tersirat dalam desain fasilitas ini. Lihat kelanjutan tabel pada Gambar 27b. Tabel dari PT Lapi ITB (2020).

DSTF	Parameters	Annual Average		Peaks Daily	
		mm/year	m^3/year	mm/day	m^3/day
	Estimation Drainage collected	652.08	147,434.81	4.16	1092.62
	Estimation Leakege to Aquifer	30.96	8120.99	0.08	22.92
P08	Precipitation	3,024.06	612,069.30	861.1	174,286.64
	Estimation Drainage collected	565.08	114,373.24	6.43	1302.64
	Estimation Leakege to Aquifer	30.78	6,230.60	0.08	17.67
Total Estimation Drainage collected		533,925 m^3/year		4466.86 m^3/day	
Total Estimation Leakege to Aquifer		29,326 m^3/ year		82.86 m^3/day	

Gambar 27b. Sebuah laporan konsultasi oleh PT Lapi ITB memperkirakan bahwa masing-masing 8.121 dan 6.231 meter kubik air yang berpotensi terkontaminasi akan meresap setiap tahun dari bagian P09 dan P08 (lihat Gambar 21) dari Fasilitas Tailing yang Difilter (*Dry Stack Tailings Facility*/DSTF) di tambang PT HPL ke dalam akuifer bawah tanah. Total rembesan dari seluruh bagian diperkirakan mencapai 29.326 meter kubik air yang berpotensi terkontaminasi per tahun. Dengan demikian, potensi kontaminasi air tanah tampaknya telah tersirat dalam desain fasilitas ini. Lihat awal tabel pada Gambar 27a. Tabel dari PT Lapi ITB (2020).

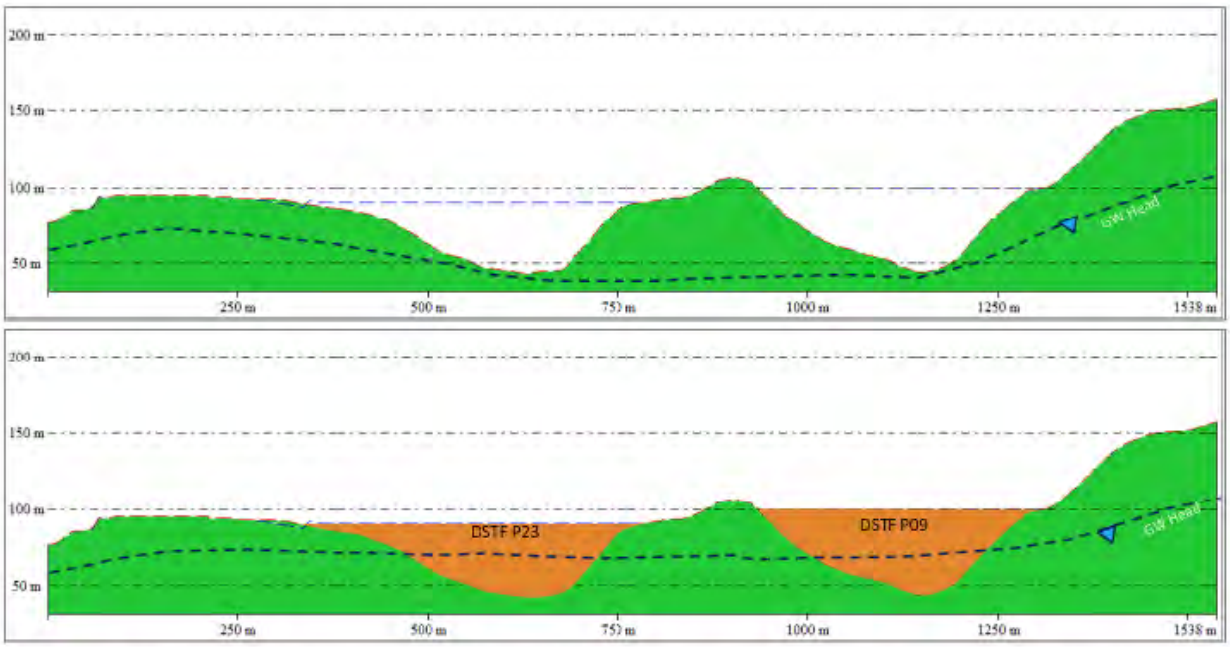


Figure III-11 Changes in Groundwater Contour Results of Numerical Simulation Due to DSTF Placement

Gambar 28. Sebuah laporan konsultasi oleh PT Lapi ITB memperkirakan kenaikan muka air tanah di dalam Fasilitas Tailing yang Difilter (*Dry Stack Tailings Facility*/DSTF) di tambang PT HPL akibat ketidakmampuan rembesan dari fasilitas tersebut untuk mengalir cukup cepat ke dalam akuifer bawah tanah (lihat Gambar 27a-b). Laporan konsultasi lain oleh Hatch (2020) menyatakan kekhawatiran bahwa kenaikan muka air tanah dapat menyebabkan ketidakstabilan dan likuifaksi timbunan tailing yang difilter. Menurut Hatch (2020), "Dalam pemodelan hidrogeologi mereka [oleh PT Lapi] ditunjukkan bahwa muka air tanah akan naik secara lokal di lokasi timbunan tailing hingga sekitar 30 m hingga 80 mdpl … Ini menunjukkan bahwa sistem drainase internal dalam timbunan tailing juga akan diperlukan untuk menurunkan muka air tanah dan mengurangi risiko ketidakstabilan lereng dan likuifaksi tailing … Kesimpulan dari analisis stabilitas ini adalah bahwa permukaan freatik atau permukaan air di dalam timbunan tailing harus dijaga di bawah kedalaman 30 m dari elevasi akhir timbunan untuk memenuhi kondisi stabilitas pseudostatik [seismik]." Gambar dari PT Lapi ITB (2020).

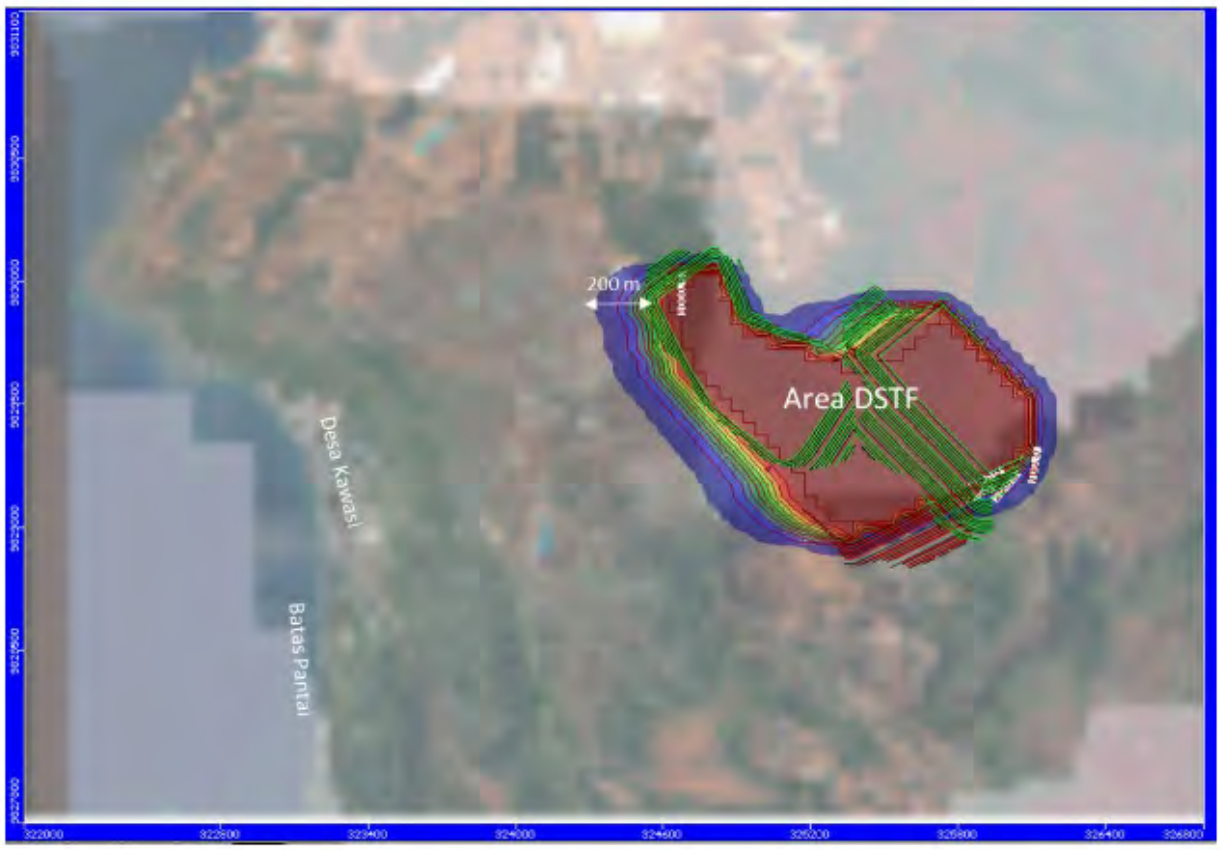


Figure III-12 Spread of Contaminants In 10th Year

Gambar 29a. Sebuah laporan konsultasi oleh PT Lapi ITB memperkirakan sebaran air yang berpotensi terkontaminasi yang akan meresap dari Fasilitas Tailing yang Difilter (*Dry Stack Tailings Facility*/DSTF) di tambang PT HPL ke dalam akuifer bawah tanah. Dengan demikian, potensi kontaminasi air tanah tampaknya telah tersirat dalam desain fasilitas ini. Lihat sebaran setelah 50 tahun dan 100 tahun, masing-masing pada Gambar 29b dan 29c. Gambar dari PT Lapi ITB (2020).

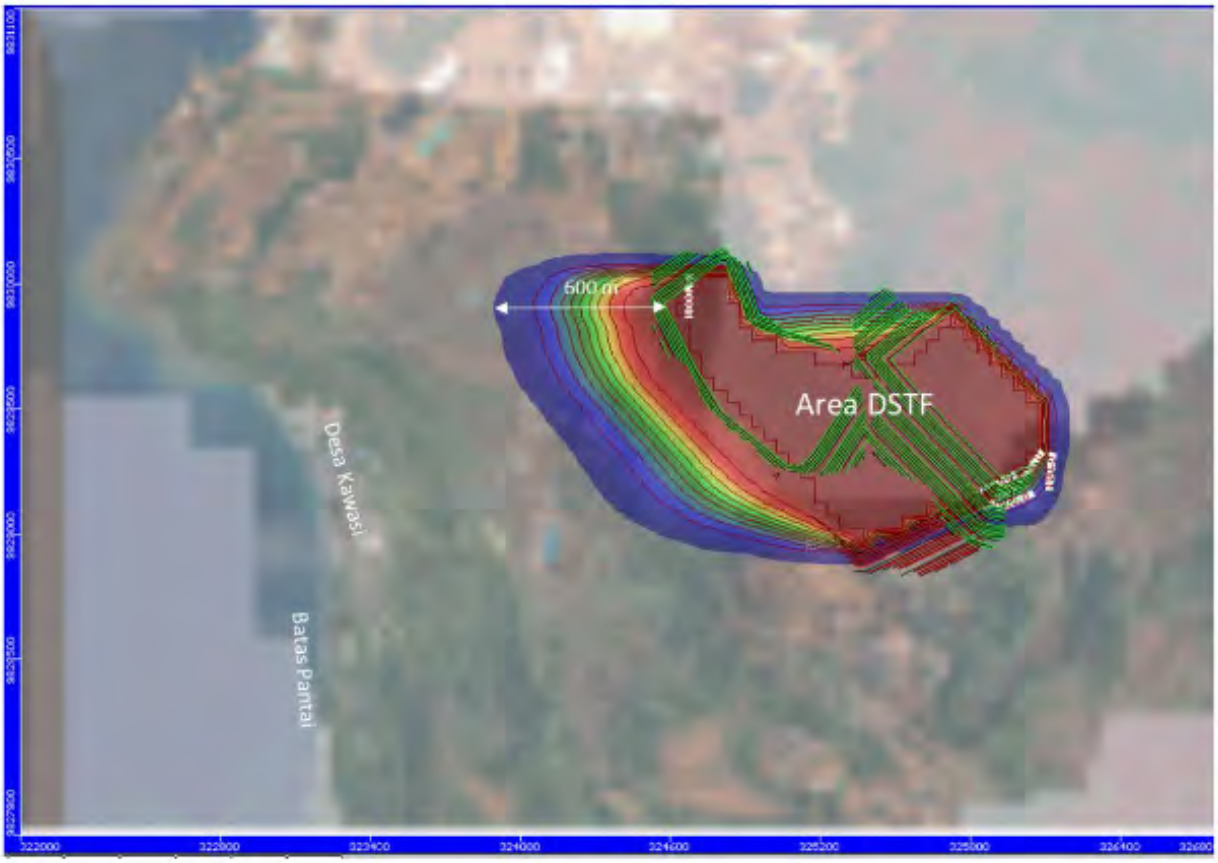
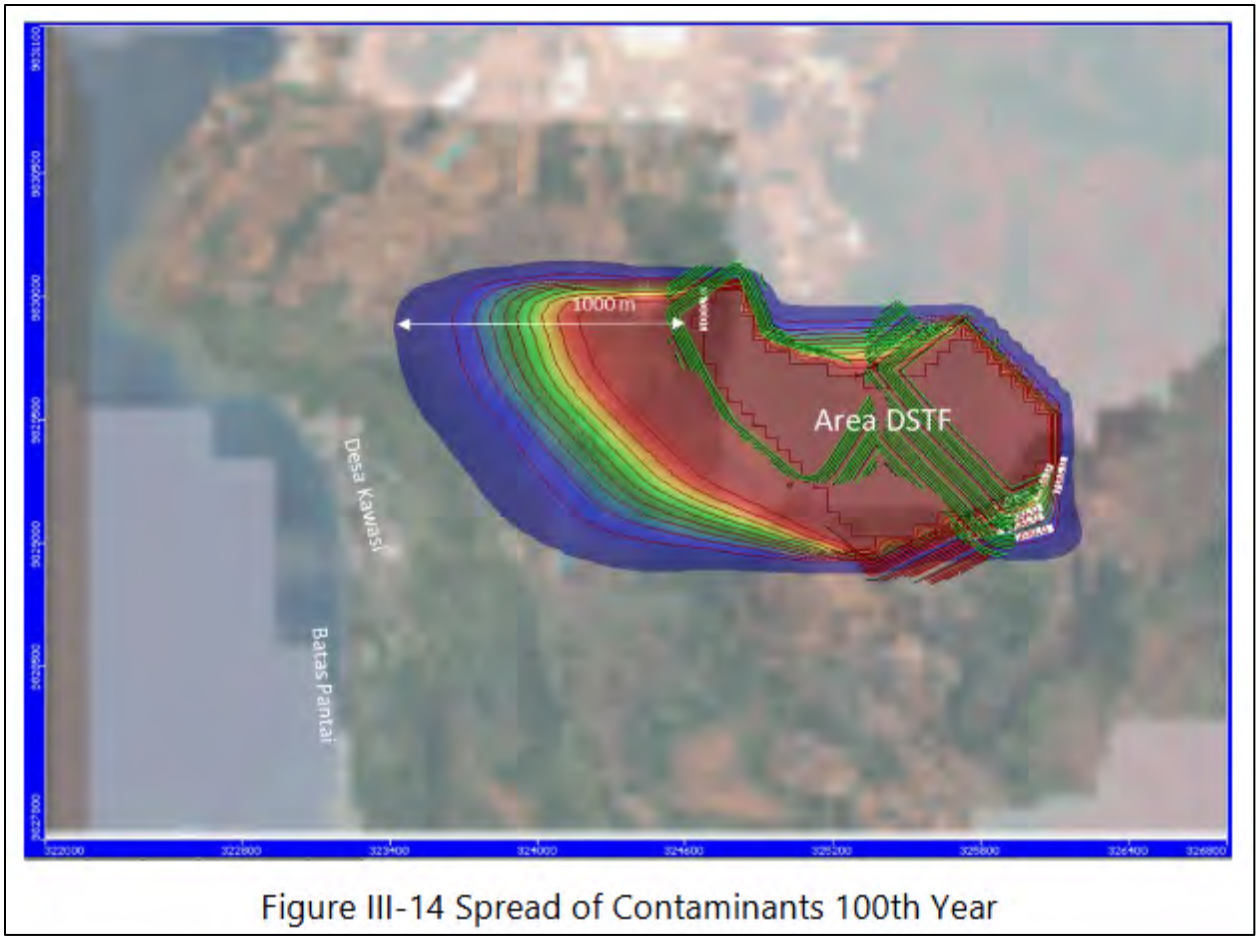


Figure III-13 Spread of Contaminants 50th Year

Gambar 29b. Sebuah laporan konsultasi oleh PT Lapi ITB memperkirakan sebaran air yang berpotensi terkontaminasi yang akan meresap dari Fasilitas Tailing yang Difilter (*Dry Stack Tailings Facility*/DSTF) di tambang PT HPL ke dalam akuifer bawah tanah. Dengan demikian, potensi kontaminasi air tanah tampaknya telah tersirat dalam desain fasilitas ini. Lihat sebaran setelah 10 tahun dan 100 tahun, masing-masing pada Gambar 29a dan 29c. Gambar dari PT Lapi ITB (2020).



Gambar 29c. Sebuah laporan konsultasi oleh PT Lapi ITB memperkirakan sebaran air yang berpotensi terkontaminasi yang akan meresap dari Fasilitas Tailing yang Difilter (*Dry Stack Tailings Facility*/DSTF) di tambang PT HPL ke dalam akuifer bawah tanah. Dengan demikian, potensi kontaminasi air tanah tampaknya telah tersirat dalam desain fasilitas ini. Lihat sebaran setelah 10 tahun dan 50 tahun, masing-masing pada Gambar 29a dan 29b. Gambar dari PT Lapi ITB (2020).

Ringkasan kontaminasi air tanah dari DSTF oleh SRK Consulting (2022a) terlihat cakupannya sangat kecil dan tidak kuantitatif jika dibandingkan dengan banyaknya data tentang kontaminasi air tanah yang dimiliki oleh Harita Nickel, perusahaan pengelola PT HPL, pada saat penyerahan akhir laporan konsultasi tersebut. Moskowitz et al. (2025) dan Leavitt (2025) mendokumentasikan bahwa Harita Nickel telah mengetahui adanya kontaminasi air tanah oleh Cr+6 setidaknya sejak tahun 2012. Lebih jauh lagi, telah ada laporan media tentang kontaminasi air tanah oleh proyek PT HPL pada Februari 2022 (Firdaus, 2022), jauh sebelum finalisasi laporan oleh SRK Consulting (2022a) pada Desember 2022. Laporan media lebih lanjut tentang kontaminasi air tanah oleh proyek PT HPL terjadi pada tahun berikutnya (Tan et al., 2023), diikuti dengan sanggahan oleh PT Trimegah Bangun Persada (2023b), di mana Harita Group merupakan pemegang saham mayoritas (86,48%) (TBP dan Harita Nickel, 2025).

Moskowitz et al. (2025) merangkum riwayat kontaminasi air tanah, terutama dalam hal dampaknya terhadap sebuah mata air yang menjadi sumber air minum bagi desa Kawasi, yang hanya berjarak 200 meter dari pabrik pengolahan HPAL. Menurut Moskowitz et al. (2025), "Pada Februari 2022, Guardian melaporkan bahwa air minum di Kawasi mengandung kadar

kromium heksavalen yang tinggi, bahan kimia beracun yang juga dikenal sebagai kromium-6 … Selama satu dekade, pemantauan internal Harita Group sendiri berulang kali menemukan kromium-6 mencemari perairan di sekitar Kawasi, seperti yang ditunjukkan oleh ratusan surel perusahaan yang bocor, catatan pengujian, dan dokumen lainnya. Data yang dikumpulkan hanya dua hari sebelum laporan Guardian diterbitkan menunjukkan bahwa kadar kromium-6 jauh di atas batas hukum saat itu … Laporan internal yang dilakukan dalam empat hari pertama bulan [Februari 2022] menunjukkan kadar kromium-6 di mata air Kawasi melampaui batas hukum Indonesia pada enam dari delapan pengukuran. Satu pengukuran lainnya, yang diambil hanya dua hari sebelum laporan Guardian terbit, menunjukkan kadar kromium-6 sebesar 128 bagian per miliar di mata air Kawasi—lebih dari dua kali lipat batas tersebut." Moskowitz et al. (2025) melanjutkan, "Pada Agustus 2022, Harita mengadakan penyelidikan internal untuk mengetahui seberapa banyak kromium-6 yang dilepaskan oleh operasinya di Obi. Dari penyelidikan itu ditemukan bahwa kadar kromium-6 di mata air Kawasi telah melampaui batas Indonesia sebesar 50 bagian per miliar pada seluruh 30 hari pengujian yang dilakukan bulan itu … Namun, sebuah laporan internal Harita yang beredar beberapa hari kemudian, pada 5 September [2022], menyebutkan bahwa mata air Kawasi 'menunjukkan kadar Cr6+ yang tinggi secara konsisten.' Laporan itu menyebutkan limbah dari fasilitas mereka sebagai sumber kontaminasi di sungai lokal. Air tanah yang terkontaminasi diidentifikasi sebagai sumber polusi di mata air tersebut … Pada bulan yang sama, Februari 2023, Harita mencatat kadar kromium-6 sebesar 173 bagian per miliar di mata air Kawasi, lebih dari tiga kali lipat ambang batas hukum untuk air minum."

Berdasarkan informasi yang tersedia, tampaknya SRK Consulting tidak meminta dokumen relevan dari perusahaan tambang atau mengajukan pertanyaan-pertanyaan paling mendasar. Mengingat SRK Consulting meninjau kontaminasi air tanah dalam konteks evaluasi terhadap DSTF, maka akan relevan untuk menanyakan apakah kontaminasi air tanah yang dilaporkan berasal dari DSTF atau dari infrastruktur lain dalam proyek PT HPL, seperti pabrik pengolahan HPAL, dan untuk memasukkan informasi tersebut ke dalam laporannya. Pertanyaan ini menjadi sangat penting, karena laporan konsultasi lainnya (PT Lapi ITB, 2020) dapat mengarahkan pada prediksi kuantitatif tentang kontaminasi air tanah yang akan terjadi dari DSTF. Upaya awal untuk menjawab pertanyaan tersebut seharusnya dilakukan dengan meminta data kuantitatif tentang kontaminasi air tanah dan air permukaan beserta lokasi pengambilan sampelnya, guna menilai apakah pola spasialnya konsisten dengan DSTF sebagai sumber kontaminasi. Pendekatan yang gagal dari pihak SRK Consulting untuk mengajukan pertanyaan kunci dan mengumpulkan data relevan akan dibahas lebih lanjut dalam bagian ini.

Kerentanan terhadap Likuifaksi

Laporan konsultasi oleh PT Lapi ITB (2020) juga mengevaluasi kerentanan tailing terhadap likuifaksi berdasarkan hubungan empiris antara indeks plastisitas (PI), batas cair (LL), dan kadar air geoteknik (wC) dari tailing yang dikembangkan oleh Seed et al. (2003) (lihat Gambar 30a). Menurut PT Lapi ITB (2020), "Tanah dengan $12 < PI \leq 20$, $37 < LL \leq 47$ dan $wC/LL > 0{,}85$ termasuk dalam zona B, diklasifikasikan sebagai memiliki kerentanan sedang terhadap likuifaksi dan memerlukan pengujian lebih lanjut … Berdasarkan metodologi ini, tailing kering termasuk dalam zona B [dan] dikategorikan sebagai rentan terhadap likuifaksi jika kadar air > 35,45%." Menurut SRK Consulting (2022a), kadar air geoteknik target adalah 35%, sehingga kerentanan terhadap likuifaksi dapat dikatakan sebagai kondisi normal. Laporan konsultasi oleh Hatch (2020) pada tahun yang sama menilai potensi likuifaksi tailing berdasarkan

hubungan empiris yang berbeda antara indeks plastisitas (PI) dan rasio kadar air geoteknik (wC) terhadap batas cair (LL) yang dikembangkan oleh Bray et al. (2004) (lihat Gambar 30b). Menurut Hatch (2020), "Terlihat bahwa tailing yang difilter dari Proyek Obi milik PT HPL memiliki kerentanan sedang terhadap likuifaksi dan pengujian lebih lanjut direkomendasikan."

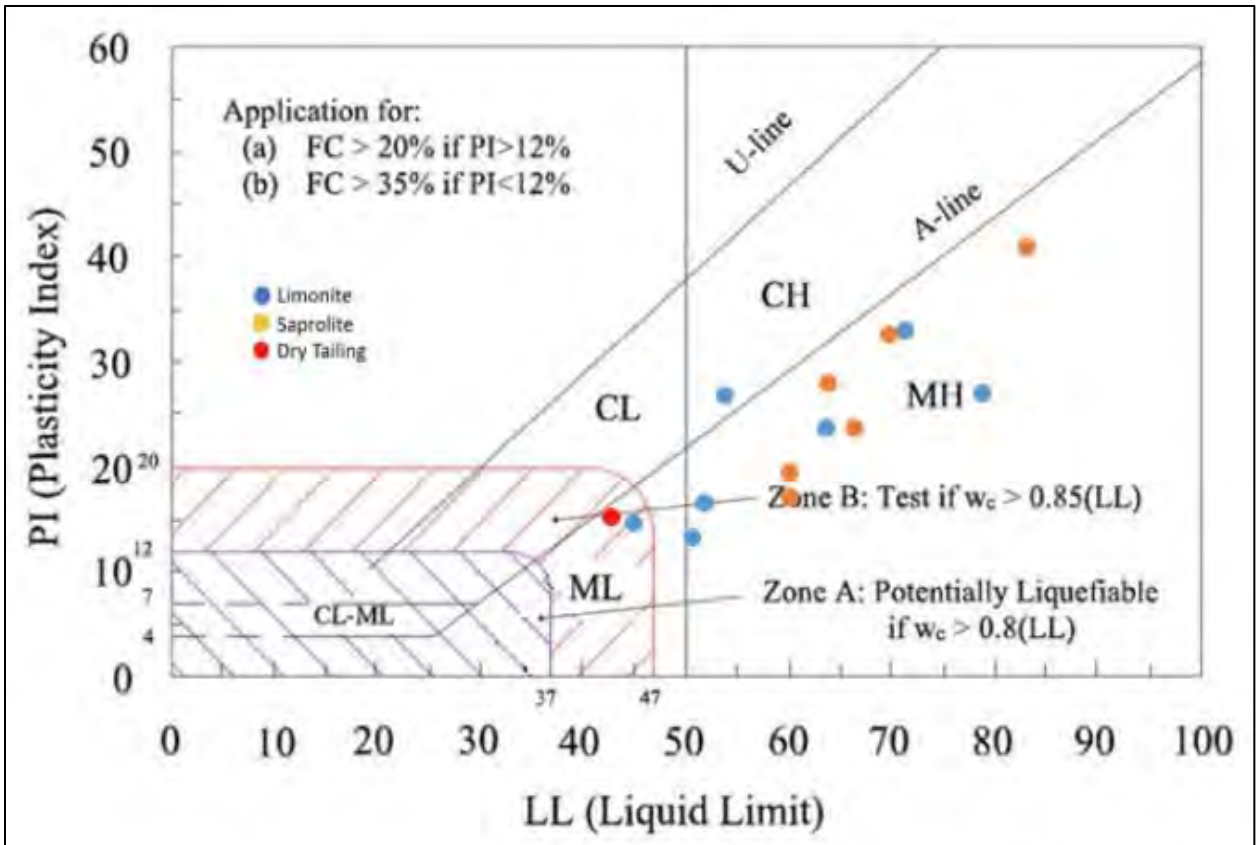
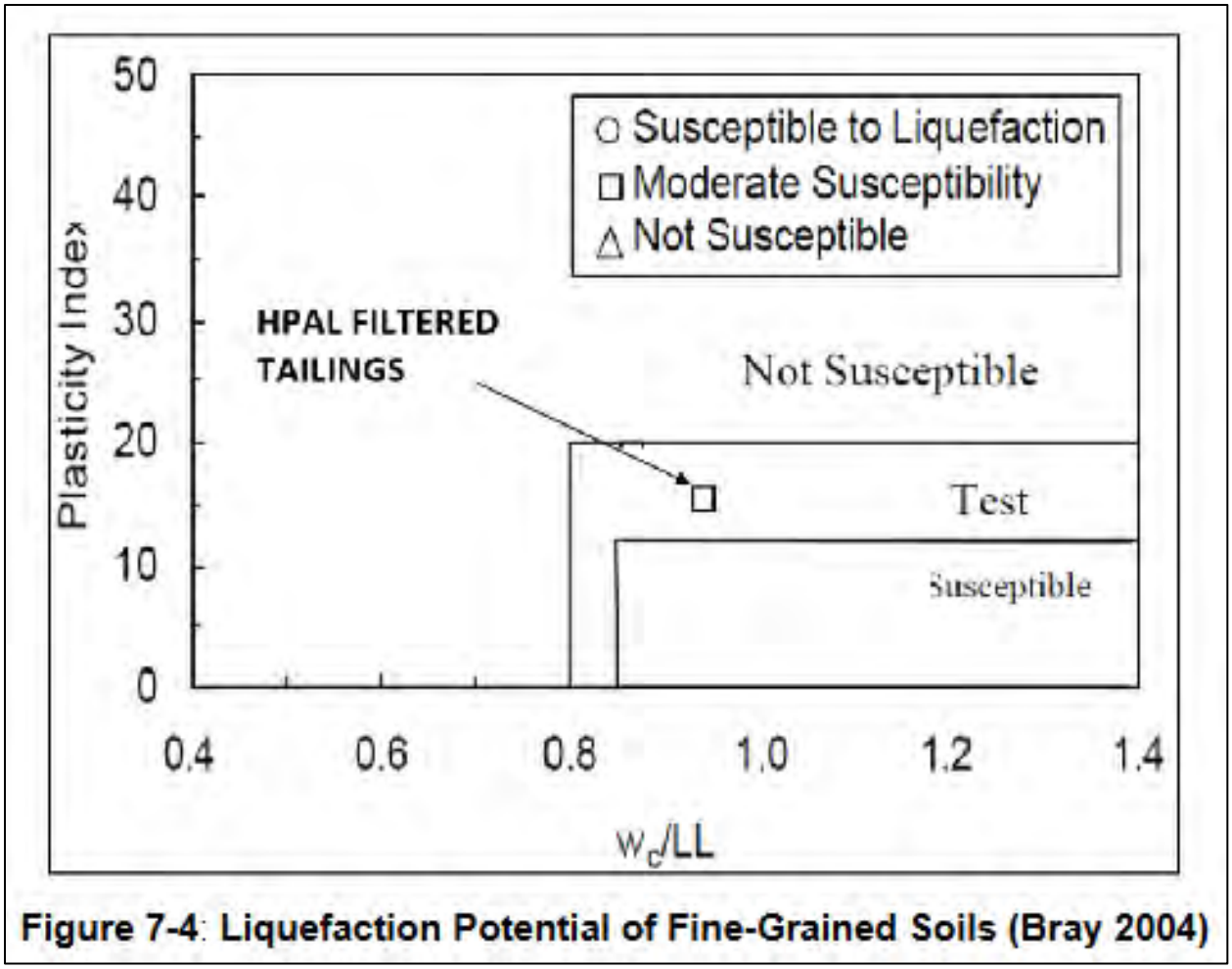


Figure II-5 Early Assessment of Liquefaction Susceptibility (Seed et al. (2003))

Gambar 30a. Menurut laporan konsultasi yang dirilis PT Lapi ITB (2020), berdasarkan kriteria yang ditentukan oleh Seed et al. (2003), "Tanah dengan 12 < PI ≤ 20, 37 < LL ≤ 47 dan wC/LL > 0,85 termasuk dalam zona B, diklasifikasikan sebagai memiliki kerentanan tingkat sedang terhadap likuifaksi dan memerlukan pengujian lebih lanjut … Berdasarkan metodologi ini, tailing kering termasuk dalam zona B [dan] dikategorikan sebagai rentan terhadap likuifaksi jika kadar air > 35,45%." Kadar air geoteknik (wC) adalah rasio antara massa air terhadap massa partikel padat. Batas cair (LL) adalah kadar air geoteknik di atas mana campuran air dan partikel padat berperilaku seperti cairan, sedangkan batas plastis (PL) adalah kadar air geoteknik di atas mana campuran tersebut berperilaku seperti plastis. Indeks plastisitas (PI) adalah selisih antara batas cair dan batas plastis, di mana batas-batas tersebut dinyatakan dalam prosentase. CL = lempung dengan plastisitas rendah, ML = lanau dengan plastisitas rendah, CH = lempung dengan plastisitas tinggi, MH = lanau dengan plastisitas tinggi. Gambar dari PT Lapi ITB (2020).



Gambar 30b. Menurut laporan konsultasi oleh Hatch (2020), berdasarkan kriteria yang ditentukan oleh Bray et al. (2004), "Tailing yang difilter dari Proyek Obi milik PT HPL memiliki kerentanan tingkat sedang terhadap likuifaksi dan pengujian lebih lanjut direkomendasikan." Kriteria yang dikembangkan oleh Bray et al. (2004) bergantung pada hubungan empiris antara indeks plastisitas dan rasio kadar air geoteknik (wC) terhadap batas cair (LL). Kadar air geoteknik adalah rasio antara massa air terhadap massa partikel padat. Batas cair adalah kadar air geoteknik di atas mana campuran air dan partikel padat berperilaku seperti cairan, sementara batas plastis adalah kadar air geoteknik di atas mana campuran tersebut berperilaku seperti plastis. Indeks plastisitas adalah selisih antara batas cair dan batas plastis, yang keduanya dinyatakan dalam bentuk persentase. Gambar dari Hatch (2020).

Laporan oleh Hatch (2020) menyampaikan kekhawatiran bahwa kenaikan muka air tanah di dalam DSTF yang diprediksi oleh PT Lapi ITB (2020) (lihat Gambar 28) dapat menyebabkan ketidakstabilan dan likuifaksi tumpukan tailing yang difilter. Menurut Hatch (2020), "Dalam pemodelan hidrogeologi mereka [oleh PT Lapi ITB] ditunjukkan bahwa muka air tanah akan naik secara lokal di lokasi tumpukan tailing hingga sekitar 30 m hingga 80 mdpl … Ini menunjukkan bahwa sistem drainase internal dalam tumpukan tailing juga akan diperlukan untuk menurunkan muka air tanah dan mengurangi risiko ketidakstabilan lereng serta likuifaksi tailing … Kesimpulan dari analisis stabilitas ini adalah bahwa permukaan freatik atau muka air di dalam tumpukan tailing harus dijaga di bawah kedalaman 30 m dari elevasi akhir tumpukan untuk memenuhi kondisi stabilitas pseudostatik [seismik]." Hatch (2020) menekankan bahwa kelebihan air dalam tumpukan tailing yang difilter tidak hanya berasal dari curah hujan dan limpasan

permukaan, tetapi juga dari pelepasan air saat tailing yang difilter mengalami konsolidasi seiring waktu dan akibat beban dari tailing yang menumpuk di atasnya.

Dalam hal ini, kadar air geoteknik tailing yang sangat tinggi merupakan faktor krusial. Menurut Hatch (2020), "Tailing yang difilter sebagaimana dirancang memiliki kadar air di tempat sebesar 30%. Seiring waktu, saat tailing terkonsolidasi, ini akan menghasilkan sejumlah besar air … Konsultan harus memilih lokasi terbaik untuk setiap drainase dan menentukan ukurannya berdasarkan perkiraan jumlah air yang akan dikumpulkan. Air ini sebagian besar berasal dari konsolidasi tailing yang difilter serta kenaikan muka air tanah di dalam tumpukan tailing." Perlu dicatat bahwa Hatch (2020) mengasumsikan kadar air geoteknik target yang lebih rendah (30%) dibandingkan 35% yang disebutkan oleh SRK Consulting (2022a), sementara PT Lapi ITB (2020) menyatakan kadar air geoteknik target sebagai "sekitar 30%-35%." Laporan selanjutnya oleh PT Lapi ITB (2022) tidak menyebutkan kadar air geoteknik target, tetapi menekankan bahwa kadar air tailing tidak boleh menyimpang lebih dari 2,5% dari target.

Menurut Hatch (2020), DSTF dirancang untuk memiliki faktor keamanan statik minimum sebesar 1,5 (lihat Gambar 31), yang konsisten dengan sebagian besar peraturan dan dokumen panduan internasional (ANCOLD, 2012, 2019; Canadian Dam Association, 2013, 2019; Fell et al., 2015; Government Gazette—Republic of South Africa, 2015; Schnaid et al., 2020; ICOLD, 2022; Ministry of Energy, Mines and Low Carbon Innovation (British Columbia), 2024; FEMA, 2025). Kondisi beban "Akhir Konstruksi," di mana faktor keamanan statik minimum sebesar 1,3 masih dapat diterima (lihat Gambar 31), merujuk pada masa sebelum adanya penempatan tailing atau air. Sebagai contoh, menurut FEMA (2025), "Kondisi akhir konstruksi secara konvensional diterapkan pada bendungan air untuk mengakui bahwa tekanan pori akibat konstruksi sering kali berkembang pada fondasi dan/atau tanggul sebelum bendungan mulai digunakan. Faktor keamanan minimum biasanya ditetapkan pada 1,3 karena ini adalah kondisi sementara tanpa penyimpanan dan konsekuensi dari kegagalan dianggap rendah. Untuk bendungan tailing, hal ini bisa berlaku pada pembangunan tanggul awal atau bagian yang ditinggikan sebelum padatan dan air disimpan dengan mempertimbangkan tekanan pori berlebih. Namun, ketika terdapat risiko geser tak terdrainase jangka panjang, faktor keamanan yang dikembangkan untuk kondisi beban jangka pendek tidak berlaku." Dengan demikian, dalam kasus DSTF, "Akhir Konstruksi" merujuk pada saat tanggul penahan dari batuan telah dibangun, tetapi belum ada tailing atau air yang ditempatkan di belakang tanggul tersebut (lihat Gambar 21–22).

Meskipun Hatch (2020) merujuk pada ANCOLD (Komite Nasional Bendungan Besar Australia) dalam menetapkan faktor keamanan minimum sebesar 1,1 untuk kondisi beban pseudostatik (lihat Gambar 31), faktor keamanan pseudostatik sebenarnya tidak ditemukan dalam ANCOLD (2012, 2019). Faktanya, menurut ANCOLD (2012, 2019), "Perlu dicatat bahwa analisis pseudo-static sebagai alat penyaringan untuk stabilitas gempa sekarang tidak lagi direkomendasikan." Dalam tinjauannya terhadap DSTF, SRK Consulting (2022a) mengonfirmasi, "Perlu dicatat bahwa menurut pembaruan pedoman terbaru, nilai pseudo-static seharusnya dihapus, dan analisis pasca-gempa perlu dilakukan. Ini juga akan memerlukan pekerjaan tambahan untuk mengubahnya." Namun demikian, faktor keamanan minimum sebesar 1,1 untuk kondisi beban pseudostatik dapat ditemukan dalam banyak dokumen panduan lainnya, termasuk standar internal perusahaan tambang (Barrick Gold, 2012; ABNT, 2017; Morrill et al., 2022), dan tetap merupakan titik awal yang berguna. Perlu juga dicatat bahwa konsep faktor

keamanan yang lebih rendah untuk "Akhir Konstruksi" juga tidak ditemukan dalam ANCOLD (2012, 2019).

LAPIITB confirms that the Slope Stability Acceptance Criteria as recommended has been applied in the final design.

Table 9-2: Slope Stability Acceptance Criteria

Loading Conditions	Required Factor of Safety
End of Construction (short-term)	1.3
Static Long-term	1.5
Pseudostatic	1.1 (ANCOLD)

Gambar 31. Menurut Hatch (2020), Fasilitas Tailing Tumpuk Kering (DSTF) di tambang PT HPL dirancang untuk memiliki faktor keamanan statik minimum sebesar 1,5. Angka ini sesuai dengan sebagian besar peraturan dan dokumen panduan internasional. Kondisi beban "Akhir Konstruksi" merujuk pada masa sebelum adanya penempatan tailing atau air. Dengan demikian, dalam kasus DSTF, "Akhir Konstruksi" merujuk pada saat tanggul penahan dari batuan telah dibangun, tetapi belum ada tailing atau air yang ditempatkan di belakang tanggul tersebut (lihat Gambar 21–22). Faktor keamanan minimum sebesar 1,1 untuk kondisi beban pseudostatik (seismik) sebenarnya tidak ditemukan dalam ANCOLD (2012, 2019), meskipun dapat ditemukan dalam peraturan dan dokumen panduan internasional lainnya. Gambar dari Hatch (2020).

Berdasarkan faktor keamanan minimum yang dipilih (lihat Gambar 31), PT Lapi ITB (2020) menunjukkan bahwa DSTF akan menjadi tidak stabil dalam berbagai kondisi, terutama sebagai respons terhadap beban seismik. Sebagai contoh, jika gempa rencana terjadi saat muka air tanah di dalam DSTF mencapai 90% dari tinggi tumpukan, faktor keamanan pseudostatik bisa mencapai serendah 0,93, tergantung pada tinggi tumpukan dan kemiringan tanggul, sementara faktor keamanan pseudostatik bisa serendah 1,05 jika muka air tanah mencapai 80% dari tinggi tumpukan (lihat Gambar 32a). Menurut SRK Consulting (2022a), kemiringan tanggul DSTF adalah 10°, sehingga ketidakstabilan seismik dapat terjadi pada ketinggian tumpukan lebih dari 30 meter jika muka air tanah mencapai 90% dari tinggi tumpukan (lihat Gambar 32a). PT Lapi ITB (2020) juga menunjukkan bahwa, jika fondasi DSTF berupa limonit, fondasi tersebut hanya akan stabil secara marginal (faktor keamanan = 1,1) sebagai respon terhadap beban seismik pada ketinggian tumpukan 14 meter (akhir Fase 1) dan 60 meter (akhir Fase 3), serta akan menjadi tidak stabil (faktor keamanan = 1,05) pada ketinggian tumpukan 80 meter (akhir Fase 4) (lihat Gambar 32b). Tidak ada dokumen yang tersedia yang menunjukkan apakah fondasi DSTF berupa limonit atau saprolit (lihat Gambar 32b).

Table II-19 Results of Slope Design Simulation

Height	Angel	Static	Dynamic (k=0.3)	
		Fos (Water table 90%)	FoS (Water table 90%)	FoS (Water table 80%)
20	5	5.73	1.24	1.31
	10	3.35	1.16	1.25
	15	2.51	1.09	1.19
	20	2.06	1.03	1.13
30	5	5.49	1.20	1.27
	10	3.10	1.09	1.19
	15	2.30	1.00	1.12
	20	1.89	0.93	1.05
40	5	5.36	1.17	1.25
	10	3.03	1.04	1.15
	15	2.21	0.96	1.08
50	5	5.28	1.15	1.24
	10	2.97	1.03	1.14
60	5	5.22	1.14	1.23
	10	2.92	1.01	1.13

Gambar 32a. Laporan konsultasi oleh PT Lapi ITB (2020) menemukan bahwa, dalam kondisi beban seismik (dinamis), Fasilitas Tailing Tumpuk Kering (DSTF) di tambang PT HPL akan menjadi tidak stabil, yang ditunjukkan dengan faktor keamanan (FoS) kurang dari 1,1, sebagaimana ditandai dengan warna merah (bandingkan dengan Gambar 31), jika muka air tanah di dalam DSTF terlalu tinggi. Satuan ketinggian seharusnya dalam meter, sedangkan kesalahan penulisan "Angel" merujuk pada kemiringan tanggul luar. Menurut SRK Consulting (2022a), tinggi maksimum adalah 57 meter, sedangkan kemiringannya adalah 10°. Tabel dari PT Lapi ITB (2020).

Terkait desain DSTF (lihat Gambar 21–22), stabilitas tanggul penahan batuan menjadi aspek paling signifikan. PT Lapi ITB (2020) menunjukkan bahwa tanggul-tanggul tersebut akan sangat tidak stabil (faktor keamanan = 0,948) dalam merespon beban seismik pada ketinggian tanggul 20 meter (lihat Gambar 32c). Menurut PT Lapi ITB (2020), "Dari hasil simulasi, dapat dilihat bahwa dengan ketinggian tanggul 20 meter, FoS dalam kondisi dinamis [tidak] memenuhi persyaratan desain … Disarankan bahwa kenaikan maksimum tanggul selama tahap konstruksi adalah 15 meter." Temuan di atas mungkin menjadi alasan mengapa tinggi tanggul dibatasi hanya 15 meter, meskipun tumpukan tailing jauh lebih tinggi dari tanggul tersebut, sehingga tailing dapat dengan mudah tumpah melewati puncak tanggul setelah mengalami likuifaksi (lihat Gambar 22). Perlu dicatat bahwa penampang melintang dalam PT Lapi ITB (2022) menunjukkan tanggul batu dengan tinggi 18 meter di ujung hilir dari seksi P-08 pada DSTF (lihat Gambar 21–22).

Table II-21 Consolidation of Base Soil Foundation and Stability Analysis Results

Fondation Material	Construction Phase	Height (m)	Consolidation at 15 days		Final Consolidation		
			Max. Displacement (m)	FoS	Max. Displacement (m)	FoS	
						Static	Dynamic
Limonite	Phase 1	14	0.2648	1.859	0.3197	3.47	1.10
	Phase 2	30	0.7574	2.565	1.295	2.60	1.19
	Phase 3	60	1.494	1.944	2.978	2.61	1.10
	Phase 4	80	2.544	1.396	4.314	3.61	1.05
Saprolite	Phase 1	14	0.206	2.609	0.2041	2.60	1.46
	Phase 2	30	0.808	2.556	0.8515	2.60	1.36
	Phase 3	60	1.596	2.009	1.971	2.58	1.13
	Phase 4	80	2.451	1.412	3.023	3.29	1.11

Gambar 32b. Laporan konsultasi oleh PT Lapi ITB (2020) menemukan bahwa, dalam kondisi beban seismik (dinamis), fondasi di bawah Fasilitas Tailing Tumpuk Kering (DSTF) di tambang PT HPL akan menjadi tidak stabil, yang ditunjukkan dengan faktor keamanan (FoS) kurang dari 1,1, sebagaimana ditandai dengan warna merah (bandingkan dengan Gambar 31), jika tinggi tumpukan dinaikkan hingga 80 meter (Fase 4). Namun, laporan tersebut juga menunjukkan bahwa fondasi akan berada pada batas atas kestabilan (FoS = 1,1) jika tumpukan setinggi 14 meter atau 60 meter. Tidak ada dokumen yang tersedia yang menunjukkan apakah fondasi di bawah DSTF terdiri dari limonit atau saprolit. Tabel dari PT Lapi ITB (2020).

Table II-23 Results of Buttress Consolidation and Stability Analysis

Fondation Material	Construction Phase	Height (m)	Consolidation at 6 days		Final Consolidation		
			Max. Displacement (m)	FoS	Max. Displacement (m)	FoS	
						Static	Dynamic
Stage 1	Phase 1	5	0.0911	2.606	0.1193	2.618	1.334
	Phase 2	10	0.1817	1.945	0.2501	1.989	1.304
	Phase 3	15	0.2411	1.593	0.3839	1.756	1.276
	Phase 4	20	0.4057	1.394	0.5234	1.622	0.948
Stage 2	Phase 1	5	0.4309	1.741	0.5162	1.753	1.285

Gambar 32c. Sebuah laporan konsultasi yang dirilis PT Lapi ITB (2020) mengemukakan bahwa, di bawah beban seismik (dinamis), tanggul batu penahan (lihat Gambar 21–22) dari Fasilitas Tailing yang Difilter dan Ditumpuk Kering (*Dry Stack Tailings Facility*/DSTF) di tambang PT HPL akan berada dalam kondisi tidak stabil, dengan faktor keamanan (FoS) kurang dari 1,1 sebagaimana ditunjukkan dalam warna merah (bandingkan dengan Gambar 31), jika ketinggian tanggul dinaikkan menjadi 20 meter. Menurut PT Lapi ITB (2020), "Dari hasil simulasi, terlihat bahwa pada ketinggian tanggul 20 meter, FoS dalam kondisi dinamis [tidak] memenuhi standar desain yang disyaratkan… Disarankan agar kenaikan maksimum tanggul selama tahap konstruksi adalah 15 meter." Namun, perlu dicatat bahwa tanggul yang jauh lebih rendah daripada timbunan tailing akan memungkinkan tailing yang mengalami likuifaksi untuk tumpah melewati puncak tanggul (lihat Gambar 22). Tabel dari PT Lapi ITB (2020).

Akhirnya, PT Lapi ITB (2020) menunjukkan bahwa DSTF akan berada dalam kondisi tidak stabil sebagai respon terhadap beban seismik jika tailing ditimbun terlalu cepat (lihat Gambar 32d). PT Lapi ITB (2020) hanya menyebutkan bahwa faktor keamanan akan kurang dari

1,0, tetapi tidak mencantumkan nilai yang dihitung. PT Lapi ITB (2020) juga tidak menyebutkan laju penimbunan yang diharapkan (lihat Gambar 32d). Namun demikian, karena umur fasilitas ini diperkirakan enam tahun (SRK Consulting, 2022a) dan dibangun dalam tiga bagian, dengan tiga atau empat fase (kenaikan ketinggian sekitar 15 meter per fase), maka laju penimbunan yang diharapkan adalah 183–243 hari per fase. Oleh karena itu, untuk laju penimbunan yang diharapkan tersebut, faktor keamanan pseudostatik untuk bagian P-09 (1,105) hanya sedikit melebihi faktor keamanan minimum pada ketinggian maksimum (55,72 meter) (lihat Gambar 32d). Meskipun pembahasan ini berfokus pada ketidakstabilan seismik, perlu dicatat bahwa PT Lapi ITB (2020) menunjukkan faktor keamanan statik yang memadai (lihat Gambar 32a–d). Faktor keamanan statik yang sebenarnya akan dibahas kembali dalam subbagian berikutnya, "Kurangnya Pengendalian Mutu, Pemantauan, dan Kepatuhan terhadap Desain."

Table II-25 Results of Stability Analysis with Loading Rate 90 days/phase and 240 days/phase

Location	Construction Phase	Height (m)	Loading rate 90 days/phase			Loading rate 240 days/phase		
			Consolidation (m)	FoS		Consolidation (m)	FoS	
				Static	Dynamic		Static	Dynamic
P23	Phase 1	15	0.1444	1.918	1.647	0.1708	2.6	1.817
	Phase 2	30	0.2039	2.611	1.13	0.2513	2.594	1.398
	Phase 3	45	0.2287	2.793	<1	0.3038	3.621	1.243
	Phase 4	61.85	0.3064	2.577	<1	0.3964	3.53	1.168
P09	Phase 1	15	0.2603	5.535	1.62	0.2797	5.537	1.687
	Phase 2	30	0.2384	3.861	1.162	0.2595	3.889	1.161
	Phase 3	45	0.2901	3.352	<1	0.3221	3.381	1.128
	Phase 4	55.72	0.1923	2.868	<1	0.1911	2.933	1.105
P08	Phase 1	15	0.3641	4.308	2.065	0.4126	4.83	2.294
	Phase 2	30	0.2266	4.02	1.084	0.2267	4.019	1.693
	Phase 3	43	0.2673	3.194	<1	0.273	3.995	1.286

Gambar 32d. Sebuah laporan konsultasi yang dirilis PT Lapi ITB (2020) mengungkapkan bahwa, di bawah beban seismik (dinamis), Fasilitas Tailing yang Difilter dan Ditumpuk Kering (DSTF) di tambang PT HPL akan berada dalam kondisi tidak stabil, dengan faktor keamanan (FoS) kurang dari 1,1 sebagaimana ditunjukkan dalam warna merah (bandingkan dengan Gambar 31), jika tailing ditimbun terlalu cepat. PT Lapi ITB (2020) hanya menyatakan bahwa faktor keamanan akan kurang dari 1,0, tetapi tidak menyebutkan nilai yang dihitung. PT Lapi ITB (2020) juga tidak menyatakan laju penimbunan yang diharapkan. Namun demikian, karena umur fasilitas ini diperkirakan enam tahun dan dibangun dalam tiga bagian, dengan tiga atau empat fase (kenaikan ketinggian sekitar 15 meter per fase), maka laju penimbunan yang diharapkan adalah 183–243 hari per fase. Oleh karena itu, untuk laju penimbunan yang diharapkan tersebut, faktor keamanan dinamis untuk bagian P-09 (1,105) hanya sedikit melebihi faktor keamanan minimum pada ketinggian maksimum (55,72 meter). Tabel dari PT Lapi ITB (2020).

Sebagai poin terakhir, laporan konsultasi yang dirilis Hatch (2020) menunjukkan, sebagaimana telah diperkirakan, adanya ketergantungan yang kuat antara densitas tailing yang dipadatkan dengan kadar air geoteknik, di mana densitas maksimum dicapai pada kadar air optimum sebesar 35,6% (lihat Gambar 33), meskipun Hatch (2020) juga menyatakan bahwa "Tailing yang difilter sesuai desain memiliki kadar air 30% saat ditimbun." Temuan yang mengejutkan adalah bahwa grafik menunjukkan densitas maksimum sebesar 1,566 ton metrik per

meter kubik pada kadar air optimum tersebut (lihat Gambar 33), meskipun Hatch (2020) menyatakan nilainya sebagai ~1,6 ton metrik per meter kubik. Sebaliknya, densitas padat rancangannya adalah 2,22 ton metrik per meter kubik, berdasarkan kapasitas maksimum DSTF sebesar 57,2 juta ton metrik atau 25,8 juta meter kubik tailing (PT Halmahera Persada Lygend, 2024; lihat Tabel 4). PT Lapi ITB (2020) mengkritik nilai densitas maksimum yang ditentukan oleh Hatch (2020) dan menyarankan bahwa densitas maksimum yang lebih akurat adalah 1,76 ton metrik per meter kubik. Menurut PT Lapi ITB (2020), "Ringkasan hasil laboratorium dan penilaian potensi likuifaksi berdasarkan pendekatan *Critical State Line* (CSL) yang dikembangkan oleh Hatch adalah: … Berdasarkan hubungan antar fase dan distribusi ukuran partikel (*Particle Size Distribution*/PSD), densitas kering teoretis (*dry density*/ρd) sebesar 1,76 t/m3 seharusnya diharapkan untuk tanah jenuh yang menghasilkan rasio pori (e) sebesar 1,22 dengan asumsi berat jenis padatan (Gs) sebesar 3,9. Kedua uji *Standard Proctor* menghasilkan densitas kering maksimum (MDD) sebesar 1,6 t/m3, yang dianggap tidak kredibel mengingat hasil dari garis terkonsolidasi normal (tanpa pemadatan) menunjukkan rasio pori sekitar 1,42 dan ρd sebesar 1,61 t/m3 dalam rentang tekanan 50 hingga 400 kPa. Nilai hasil pemadatan dan nilai terkonsolidasi normal tidak mungkin begitu mirip untuk sampel tanah yang sama." Laporan dari Hatch (2020) diserahkan pada 18 September 2020, sementara laporan dari PT Lapi ITB (2020) diserahkan pada Agustus 2020, sehingga tampaknya PT Lapi ITB (2020) merespons versi awal dari laporan Hatch (2020).

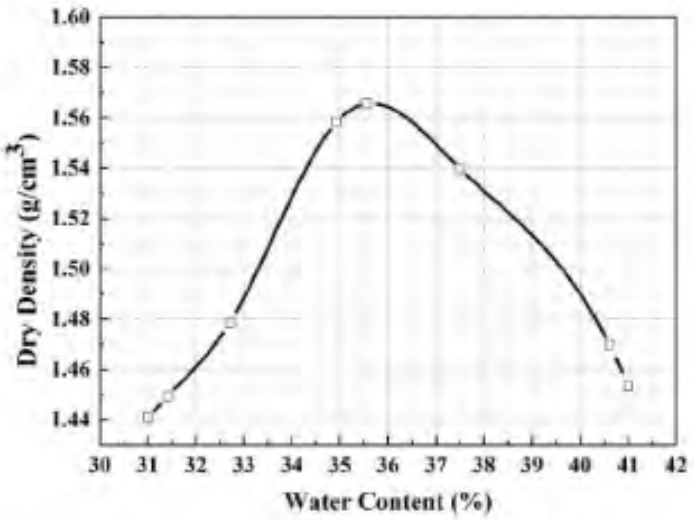


Figure 7-2: Results of Compaction Tests showing Dry Density and Water Content Relationship

Gambar 33. Sebuah laporan konsultasi yang dirilis Hatch (2020) menunjukkan adanya hubungan yang erat antara densitas kering tailing yang dipadatkan dengan kadar air geoteknik, dengan densitas kering maksimum sebesar 1,566 ton metrik per meter kubik (dinyatakan sebagai ~1,6 ton metrik per meter kubik oleh Hatch (2020)) yang dicapai pada kadar air optimum sebesar 35,6%. PT Lapi ITB (2020) menyatakan bahwa densitas kering maksimum yang diukur oleh Hatch (2020) adalah "tidak kredibel," dan mengusulkan nilai alternatif sebesar 1,76 ton metrik per meter kubik. SRK Consulting (2020a) dan PT Halmahera Persada Lygend (2024) sama-sama mengasumsikan densitas maksimum yang jauh lebih tinggi, yaitu masing-masing sebesar 2,20 dan 2,22 ton metrik per meter kubik, yang lebih umum untuk tailing yang difilter, namun hal ini menunjukkan adanya tafsir yang berbeda mengenai cara pengukuran densitas yang benar. Gambar dari Hatch (2020).

Dalam studi mereka tentang eksperimen pada tailing HPAL di Kaledonia Baru, Bodley dan Vaguener (2022) melaporkan perbedaan tafsir serupa mengenai metode yang benar untuk mengukur densitas kering tailing yang dipadatkan, serta adanya perbedaan antara pengukuran laboratorium dan lapangan. Menurut Bodley dan Vaguener (2022), "Rerata densitas kering *in-situ* adalah 1,62 t/m3. Nilai ini lebih tinggi dari perkiraan konservatif sebesar 1,29 t/m3 yang digunakan selama tahap studi. Densitas kering 1,29 t/m3 ditentukan melalui berbagai uji pemadatan standar Proctor yang dilakukan pada sampel yang dihasilkan selama uji coba percontohan. Hasil-hasil tersebut menunjukkan adanya kekurangan dan keterbatasan dalam penentuan densitas kering residu secara akurat. Perbedaan densitas ini merupakan fungsi dari variabilitas material dan menekankan pentingnya uji coba lapangan skala besar dalam penentuan parameter desain kritis ini." Sebagai perbandingan, densitas kering tipikal untuk semua jenis tailing yang difilter adalah 2,0 ton metrik per meter kubik, dengan kisaran antara 1,9 hingga 2,6 ton metrik per meter kubik (Cacciuttolo Vargas dan Pérez Campomanes, 2022), yang mendekati nilai 2,22 ton metrik per meter kubik yang diasumsikan oleh PT Halmahera Persada Lygend (2024) (lihat Tabel 4). Nilai yang benar untuk target densitas tailing yang dipadatkan, serta keandalan analisis stabilitas, akan dibahas lebih lanjut dalam subbagian berikutnya.

Kurangnya Pengendalian Mutu, Pemantauan, dan Kepatuhan terhadap Desain

Laporan dari SRK Consulting (2022a) berulang kali menekankan tidak adanya pengendalian mutu dalam pembangunan Fasilitas Tailing yang Difilter dan Ditumpuk Kering (DSTF) hingga bulan Desember 2022, terutama terkait kegagalan untuk mencapai kadar air atau densitas kering padat yang ditargetkan. Menurut SRK Consulting (2022a), "SRK diberitahu bahwa pemantauan kadar kelembaban fasilitas tailing yang difilter dan ditumpuk kering, kualitas air tanah, dan kualitas lindi dilakukan setiap bulan dan dilaporkan setiap tiga bulan. SRK telah meninjau laporan pemantauan untuk kuartal 2, 3, dan 4 tahun 2021, yang menunjukkan bahwa kadar air yang dilaporkan secara konsisten sekitar 30% lebih rendah dari target 35%." Tidak jelas apakah pernyataan tersebut berarti kadar air geoteknik tipikal adalah 5% atau 24,5%, namun keduanya jauh di bawah target kadar air 35%. SRK Consulting (2022a) melanjutkan, "Hasil uji densitas yang disediakan untuk bulan Mei hingga Oktober 2022 menunjukkan densitas kering yang dicapai berada di antara 1,66 hingga 2,20 t/m3, dengan kadar air antara 8%–36% … Selain itu, tabel ringkasan dengan hasil uji kadar air dan densitas di laboratorium dan lapangan juga disediakan, yang menunjukkan rentang densitas kering antara 0,93 hingga 2,20." SRK Consulting (2022a) juga melaporkan densitas tailing kering sebesar 1,287–1,355 t/m3 dengan catatan "Rentang nilai yang dicatat disediakan oleh TBP" [PT Trimegah Bangun Persada]. SRK Consulting (2022a) menyimpulkan, "Konsekuensi dari rendahnya tingkat pengendalian mutu membawa risiko bahwa fasilitas tailing yang difilter dan ditumpuk kering dapat dibangun dengan standar yang lebih rendah daripada desainnya."

Pengamatan berikut dapat disampaikan terkait kurangnya pengendalian mutu terhadap kadar air atau densitas tailing yang dipadatkan:

1) Densitas kering maksimum yang dipadatkan kemungkinan adalah 2,20 ton metrik per meter kubik atau sedikit lebih tinggi, yang mendekati nilai 2,22 ton metrik per meter kubik yang diasumsikan oleh PT Halmahera Persada Lygend (2024) (lihat Tabel 4), dan jauh lebih tinggi daripada nilai 1,6 ton metrik per meter kubik yang diukur oleh Hatch (2020) (lihat Gambar 33) atau nilai 1,76 ton metrik per meter kubik yang diusulkan oleh PT Lapi ITB (2020).

2) Densitas kering terendah yang diukur sebesar 0,93 ton metrik per meter kubik bahkan lebih rendah daripada densitas air (1,00 ton metrik per meter kubik) dan menunjukkan kurangnya pemadatan yang ekstrem.
3) Data yang disediakan oleh perusahaan tambang tampaknya hadir dalam berbagai bentuk, mulai dari laporan pemantauan triwulanan, tabel ringkasan, hingga surel.
4) Berdasarkan pengalaman penulis, kurangnya pengendalian mutu secara ekstrem seperti ini belum pernah terjadi sebelumnya dalam industri pertambangan.

SRK Consulting (2022a) mengakui bahwa analisis stabilitas menunjukkan faktor keamanan yang memadai untuk beban statik (lihat Gambar 32a–d), tetapi menekankan bahwa seluruh analisis tersebut mengasumsikan pemadatan tailing yang memadai. Berdasarkan tidak adanya pengendalian mutu terhadap densitas tailing, maka stabilitas statik tidak dapat lagi diasumsikan. Menurut SRK Consulting (2022a), "Hasil desain stabilitas lereng menunjukkan bahwa fasilitas tailing yang difilter dan ditumpuk kering memiliki desain yang kuat, dengan FoS di atas 2,5 (yang mana lebih tinggi dari nilai FoS 1,5 yang biasanya disyaratkan) … Desain tersebut mengasumsikan bahwa pemadatan tailing akan cukup untuk mencegah likuifaksi; namun, menurut SRK, mengingat ketinggian fasilitas (57 m) dan tidak adanya pengendalian mutu dalam penimbunan tailing, diperlukan studi lanjutan untuk menilai risiko perilaku kontraktif tailing selama geseran tak terkuras (*undrained shearing*)." Kalimat terakhir ini sangat penting dan akan dibahas lebih lanjut dalam subbagian "Genangan Permukaan dan Pembiaran yang Disengaja."

SRK Consulting (2022a) tidak memberikan komentar atas beragam kondisi di mana DSTF akan berada dalam kondisi tidak stabil akibat beban seismik (lihat Gambar 32a–d). Namun, SRK Consulting (2022a) secara implisit mencatat tidak adanya analisis terhadap stabilitas pasca-likuifaksi dari DSTF. Terkait parameter geoteknik tailing yang diukur, SRK Consulting (2022a) menulis, "Parameter-parameter tersebut tampaknya memiliki nilai yang wajar; namun, celah utama adalah bahwa kekuatan sisa tailing tidak dipertimbangkan." Kekuatan sisa (juga disebut kekuatan setelah likuifaksi atau *post-liquefaction strength*) adalah kekuatan geser tailing setelah mengalami likuifaksi (lihat Gambar 11). Praktik kontemporer menyaratkan bahwa fasilitas penyimpanan tailing harus dirancang sedemikian rupa agar tidak mengalami kegagalan yang bersifat katastrofik meskipun telah mengalami likuifaksi. Oleh karena itu, nilai faktor keamanan pasca-likuifaksi minimum sebesar 1,1 merupakan standar umum (Barrick Gold, 2012; ICOLD, 2022; FEMA, 2025), yang dihitung dengan menetapkan kekuatan sisa pada tailing yang berpotensi mengalami likuifaksi. Meskipun tidak dimungkinkan untuk menghitung faktor keamanan pasca-likuifaksi dari DSTF, sulit membayangkan bahwa DSTF dapat bertahan dari likuifaksi, karena tailing yang mengalami likuifaksi dapat meluncur melewati puncak tanggul batu penahan (lihat Gambar 22).

SRK Consulting (2022a) juga menekankan tidak adanya instrumen pemantauan maupun program inspeksi untuk DSTF, bertentangan dengan rancangan desain DSTF. Menurut SRK Consulting (2022a), "Desain menetapkan sejumlah rezim pemantauan yang dibutuhkan untuk pengoperasian fasilitas, seperti pemantauan air tanah melalui piezometer kabel bergetar (VWP) dan *standpipes*, pengukuran rembesan kaki tanggul menggunakan *v-notch weirs*, survei rutin dan pemasangan inklinometer, penyediaan investigasi uji penetrasi kerucut (CPT) setelah fasilitas tailing yang difilter dan ditumpuk kering mencapai ketinggian tertentu, serta pemantauan kualitas air dan meteorologi." SRK Consulting (2022a) menambahkan "inspeksi rutin" ke dalam daftar tersebut dan mencatat bahwa "tidak ada data yang tersedia mengenai hal-hal di atas." SRK

Consulting (2022a) menggambarkan "Pemantauan melalui piezometer dan inklinometer, inspeksi rutin, pemasangan dan pemantauan *v-notch weirs*, pemantauan kualitas air dan pemeliharaan" sebagai "Kontrol" terhadap "Risiko yang tidak terkendali" dan menyatakan, "Dicatat bahwa tidak ada bukti yang menunjukkan apakah kontrol tersebut telah diterapkan." SRK Consulting (2022a) menyimpulkan, "Sesuai dengan standar internasional, SRK merekomendasikan agar sistem pemantauan yang menyeluruh segera dibentuk." Beberapa aspek ketidakpatuhan terhadap desain sebelumnya telah dicatat dalam subbagian "Pencemaran Air Tanah" dalam laporan ini. SRK Consulting (2022a) juga mencatat, "Masalah saluran drainase keliling/kaki tanggul telah diidentifikasi dan beberapa area masih dalam tahap konstruksi … Kolam pengolahan air dalam kondisi buruk dan beberapa area masih dalam tahap konstruksi."

Berdasarkan batas bawah dari kisaran densitas tailing yang dipadatkan yang diberikan kepada SRK Consulting melalui surel (1,287 ton metrik per meter kubik), SRK Consulting (2022a) menghitung bahwa kapasitas maksimum DSTF sebenarnya hanya 33,2 juta ton metrik, bukan 57,2 juta ton metrik seperti yang dinyatakan oleh PT Halmahera Persada Lygend (2024) (lihat Tabel 4). Menurut SRK Consulting (2022a), "Dengan laju produksi saat ini, hal ini setara dengan sekitar 4,5 tahun masa operasi." Dengan kata lain, SRK Consulting (2022a) memperkirakan bahwa DSTF akan mencapai kapasitas penuhnya pada pertengahan tahun 2027, bukan menjelang akhir 2029, seperti yang konsisten dengan data dari PT Halmahera Persada Lygend (2024) (lihat Tabel 4). Kesimpulan dari SRK Consulting (2022a) tersebut sangat mengkhawatirkan, bukan hanya karena tenggat waktu penutupan yang semakin dekat, tetapi juga karena kesimpulan tersebut mengasumsikan bahwa tailing akan terus ditumpuk dengan hanya 58% dari densitas pemadatan yang ditargetkan, padahal langkah yang wajar seharusnya adalah menghentikan segera penempatan tailing di atas DSTF.

Dalam bagian berjudul "Penilaian Risiko," SRK Consulting (2022a) menggambarkan "kegagalan fasilitas tailing yang ditumpuk kering" sebagai "Risiko yang tidak terkendali." Menurut pendapat penulis, kegagalan katastrofik dari DSTF di proyek PT HPL sudah di ambang waktu. Penting untuk dicatat bahwa kurangnya pemadatan yang memadai pada lapisan bawah DSTF merupakan masalah yang tidak dapat diperbaiki. Langkah terburuk yang mungkin diambil adalah terus menempatkan tailing di atas lapisan tailing yang tidak dipadatkan secara memadai, yang tampaknya itulah yang terjadi menurut pihak perusahaan tambang (PT Halmahera Persada Lygend, 2024). Bahkan jika pengendalian mutu dilakukan dengan sempurna setelah laporan SRK Consulting (2022a) disampaikan pada Desember 2022, setiap peningkatan beban di atas tailing yang tidak dipadatkan dengan benar akan meningkatkan kemungkinan terjadinya konsolidasi mendadak yang dapat menyebabkan likuifaksi (lihat Gambar 10) dan kegagalan katastrofik dari DSTF. Dalam hal ini, perlu dicatat bahwa beberapa bagian dari lapisan bawah DSTF memiliki densitas serendah 0,93 ton metrik per meter kubik (bahkan lebih ringan dari air dan hanya 42% dari densitas pemadatan yang ditargetkan), sehingga potensi terjadinya konsolidasi mendadak dalam tingkat ekstrem sangat mungkin terjadi. Menurut pendapat penulis, langkah yang benar—dan yang seharusnya direkomendasikan oleh SRK Consulting—adalah menghentikan penempatan tailing ke DSTF, segera mengambil langkah-langkah untuk melindungi keselamatan para pekerja tambang dan masyarakat di hilir dari DSTF, dan kemudian menyusun rencana untuk menutup DSTF secara aman. Tidak adanya rencana penutupan akan dibahas dalam subbagian berikutnya. Setelah subbagian "Kurangnya Realisme dalam Analisis Bendungan Jebol," subbagian "Genangan Permukaan dan Pembiaran yang Disengaja" akan memberikan bukti lebih lanjut tentang kegagalan katastrofik DSTF yang akan segera terjadi.

Sebelum melanjutkan ke subbagian-subbagian berikutnya, perlu untuk menanggapi argumen yang menyatakan bahwa kegagalan katastrofik DSTF tidak mungkin terjadi dalam waktu dekat hanya karena kegagalan tersebut belum terjadi hingga Juni 2025. Dalam literatur mengenai keselamatan fasilitas penyimpanan tailing, keberlangsungan situasi darurat tanpa adanya respon yang memadai terhadap situasi darurat tersebut dikenal sebagai "normalisasi penyimpangan" (*normalization of deviance*). Menurut Vick (2017), "Vaughan (1996) memperkenalkan istilah *normalization of deviance* dalam analisisnya yang inovatif terhadap bencana pesawat ulang-alik Challenger, kegagalan teknologi paling ikonik pada masanya. Di dalam NASA, normalisasi penyimpangan terjadi ketika risiko dari mode kegagalan yang diketahui terus-menerus diterima hingga menjadi sesuatu yang dianggap lumrah dan biasa. Secara umum, potensi pemicu kegagalan terjadi berulang kali tanpa menimbulkan akibat buruk, hingga tercipta rasa aman yang salah dan suatu anomali sebelumnya menjadi norma baru. Alih-alih dianggap sebagai tanda bahaya, serangkaian anomali ini justru dipahami sebagai bukti bahwa semuanya baik-baik saja. Dengan demikian, sesuatu yang tak terduga menjadi sesuatu yang diharapkan, dan kemudian menjadi sesuatu yang diterima (Pinto 2014)."

Dalam tinjauannya mengenai penerapan konsep "normalisasi penyimpangan" pada fasilitas penyimpanan tailing, Vick (2017) melanjutkan, "*Normalization of deviance* dapat dipahami mengandung unsur-unsur berikut: 1) Kinerja yang dimaksudkan ditetapkan berdasarkan kriteria desain atau operasional, pengalaman lapangan, atau praktik standar. 2) Penyimpangan berulang atau berkelanjutan dari kinerja yang dimaksudkan timbul akibat anomali, kejadian tak terduga, atau modifikasi yang diadopsi. Penyimpangan ini menyebabkan penurunan kinerja dan peningkatan risiko. 3) Seiring waktu, penurunan kinerja dan peningkatan risiko menjadi sesuatu yang dirasionalisasi, diharapkan, dan diterima sebagai hal yang normal, sering kali meskipun terdapat tanda peringatan atau kejadian nyaris gagal (*near-miss*). 4) Penurunan kinerja memungkinkan terjadinya kejadian atau kondisi yang tidak dikenali yang dapat memicu terjadinya mode kegagalan, sehingga kegagalan yang sebelumnya dapat diperkirakan menjadi seolah-olah tidak terduga."

Vick (2017) secara eksplisit menerapkan konsep "normalisasi penyimpangan" dalam kasus yang sangat relevan dengan DSTF di proyek PT HPL, yaitu kegagalan untuk mengatasi kurangnya kajian berkelanjutan terhadap fondasi fasilitas penyimpanan tailing di tambang Mount Polley di British Columbia, serta kegagalan menyediakan drainase yang memadai di fasilitas penyimpanan tailing di tambang Samarco di Brasil. Kedua kegagalan tersebut masing-masing menyebabkan bencana bendungan tailing pada Agustus 2014 dan November 2015 (lihat Tabel 3). Perlu dicatat bahwa lapisan bawah tailing yang tidak dipadatkan atau dipadatkan secara lemah membentuk fondasi bagi tailing yang ditumpuk di atasnya. Selain itu, PT Lapi ITB (2020) mengidentifikasi kondisi di mana fondasi tanah di bawah DSTF dapat mengalami likuifaksi sebagai respon terhadap beban seismik (lihat Gambar 32b), jika fondasinya adalah limonit. Penulis tidak menemukan satu pun dokumen yang secara khusus meneliti kondisi geologis fondasi DSTF ini, termasuk informasi dasar mengenai jenis tanah fondasinya, apakah limonit atau saprolit (lihat Gambar 32b).

Terkait dengan kegagalan fasilitas penyimpanan tailing di Mount Polley, Vick (2017) menulis, "Bendungan Mount Polley dinaikkan berulang kali tanpa memastikan ketiadaan tanah lempung lunak di fondasinya … Penilaian Mode Kegagalan Potensial (*Potential Failure Mode/PFM*) mengidentifikasi kelongsoran lereng akibat material fondasi yang lemah sebagai salah satu mode kegagalan, namun risikonya diabaikan karena dianggap tidak signifikan …

Analisis kekuatan tanpa drainase (*Undrained Strength Analysis/USA*) untuk GLU (*Glacial Lacustrine Unit*) yang terkonsolidasi normal menunjukkan bahwa jika material ini ada, maka nilai FS dapat turun menjadi 1,1. Meskipun demikian, nilai batas tersebut tetap diterima, meski mencerminkan standar kinerja yang lebih rendah dan risiko yang meningkat. Karena pada titik itu, ketiadaan GLU lunak telah dianggap sebagai hal yang wajar dan normal—hingga pada akhirnya tanggul Perimeter dinaikkan dalam empat tahap berikutnya tanpa ada pemboran dalam di sepanjang jejaknya sepanjang 2 km. Risiko yang meningkat pun menjadi sesuatu yang diterima dan dianggap normal, sehingga lereng yang terlalu curam menjadi fitur permanen, bukan sementara."

Terkait dengan kegagalan fasilitas penyimpanan tailing di Samarco, Vick (2017) menulis, "Bendungan Fundão terus dinaikkan meskipun tingkat kejenuhan semakin meningkat—sesuatu yang tidak pernah diantisipasi dalam konsep awal untuk mengurangi risiko likuifaksi … Tak lama setelah bendungan awal mulai dioperasikan, erosi internal akibat cacat konstruksi pada saluran drainase dasar menyebabkan kerusakan yang sangat parah sehingga konsep awal tidak dapat diterapkan. Sebagai gantinya, metode penimbunan secara *upstream* terus dilakukan tanpa drainase dasar, yang mengakibatkan kejenuhan yang menyimpang dari asumsi desain semula. Seiring peningkatan tinggi bendungan, kejenuhan pasir yang semakin besar—yang ditunjukkan dengan munculnya rembesan berulang pada permukaan bendungan—memunculkan potensi terjadinya likuifaksi pasir (Morgenstern, et al. 2016). Namun pada saat itu, kejenuhan dan risiko likuifaksi yang menyertainya telah menjadi sesuatu yang diterima, dan karenanya dianggap normal dalam operasional bendungan, meskipun telah diterapkan FMEA [*Failure Modes and Effects Analysis*] secara berkelanjutan."

Minimnya Rencana Penutupan

Meskipun tenggat waktu penutupan DSTF (pertengahan 2027) semakin dekat, laporan SRK Consulting menyatakan bahwa pada dasarnya masih belum ada rencana untuk menutup DSTF secara aman. Untuk memperjelas, menurut *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management*, "Sebuah fasilitas tailing dianggap telah ditutup secara aman ketika penempatan tailing telah dihentikan dan semua kegiatan penutupan telah diselesaikan sehingga fasilitas tersebut hanya memerlukan pemantauan, inspeksi, dan pemeliharaan rutin secara terus-menerus atau hingga tidak ada lagi mode kegagalan yang kredibel" (Morrill et al., 2022). Menurut *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM), "Istilah 'mode kegagalan yang kredibel' tidak dikaitkan dengan probabilitas terjadinya peristiwa tersebut" (ICMM-UNEP-PRI, 2020). Dengan demikian, *Safety First* mendefinisikan "mode kegagalan yang kredibel" sebagai "urutan kejadian yang secara fisik memungkinkan dan berpotensi berujung pada kegagalan bendungan tailing" (Morrill et al., 2022). Buku *Tailings Management Handbook* yang diterbitkan oleh SME (Society for Mining, Metallurgy and Exploration) menambahkan penjelasan, "Dalam mengevaluasi risiko yang terkait dengan PFM (*Potential Failure Modes*), penting untuk mempertimbangkan apakah mode kegagalan tersebut kredibel atau masuk akal. Apakah PFM tersebut dapat dibayangkan atau secara fisik memungkinkan, dan apakah ada dasar teknis bagi kemungkinan terjadinya? Sebuah mode kegagalan yang tidak kredibel memiliki kemungkinan terjadinya nol" (Morrison dan Byler, 2022). Tidak banyak cara untuk menghilangkan semua mode kegagalan yang kredibel dari fasilitas penyimpanan tailing di atas permukaan tanah, kecuali dengan memindahkan seluruh tailing ke lubang tambang terbuka atau

lorong bawah tanah yang telah habis. Secara khusus, sulit dibayangkan bahwa kegagalan seismik pada DSTF dapat sepenuhnya dihapuskan sebagai kemungkinan secara fisik.

Dalam Revisi 1, SRK Consulting (2022b) menyatakan bahwa "Rencana penutupan dan estimasi biaya" adalah "Tidak tersedia" dan mencatat bahwa "Saat ini, standar internasional dan praktik terbaik industri mensyaratkan dilakukannya studi penutupan dan rehabilitasi termasuk estimasi biaya." Pada versi finalnya, SRK Consulting (2022a) masih menyatakan bahwa "Rencana penutupan dan estimasi biaya" adalah "Tidak tersedia," tetapi menambahkan catatan "Studi yang disampaikan masih pada tingkat konsep," sebelum mengulangi pernyataan mengenai standar internasional dan praktik industri tersebut. Dengan demikian, perbedaan antara tidak adanya rencana penutupan dan rencana penutupan "pada tingkat konsep" menjadi tidak sepenuhnya jelas. SRK Consulting (2022a) menyimpulkan, "Studi penutupan dan rehabilitasi secara rinci, termasuk estimasi biaya, direkomendasikan untuk segera diselesaikan."

Salah satu contoh standar internasional yang relevan adalah *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM), yang secara tegas menekankan bahwa rencana penutupan yang aman harus sudah terintegrasi sepenuhnya ke dalam desain awal fasilitas penyimpanan tailing baru, dan bukan sekadar dipertimbangkan menjelang waktu penutupan. Sebagai contoh, Prinsip 5 mengharuskan perusahaan tambang untuk "Mengembangkan desain yang kokoh yang mengintegrasikan dasar pengetahuan dan meminimalkan risiko kegagalan terhadap manusia dan lingkungan di semua fase siklus hidup fasilitas tailing, termasuk penutupan dan pascapenutupan" (ICMM-UNEP-PRI, 2020). Di dalam Prinsip 5, Persyaratan 5.5 mengharuskan perusahaan untuk "Mengembangkan desain untuk setiap tahap konstruksi fasilitas tailing, termasuk namun tidak terbatas pada tahap awal, peninggian parsial dan konfigurasi sementara, peninggian akhir, dan semua tahap penutupan" (ICMM-UNEP-PRI, 2020). Persyaratan 5.6 mewajibkan perusahaan untuk "Merancang fase penutupan sedemikian rupa sehingga memenuhi seluruh Persyaratan Standar ini dengan tingkat detail yang cukup untuk menunjukkan kelayakan skenario penutupan dan memungkinkan pelaksanaan elemen-elemen desain selama konstruksi dan operasional, sebagaimana mestinya. Desain harus mencakup penutupan dan reklamasi progresif selama masa operasi" (ICMM-UNEP-PRI, 2020). Anggota Perusahaan dari ICMM diwajibkan untuk sepenuhnya mematuhi GISTM paling lambat 5 Agustus 2023 (ICMM, 2020, 2021). Meskipun PT Halmahera Persada Lygend maupun perusahaan induknya bukan Anggota Perusahaan, perlu dicatat bahwa Anggota Asosiasi ICMM mencakup *Australasian Institute of Mining and Metallurgy* (AusIMM), *Cobalt Institute*, *Japan Mining Association* (JMAI), *Minerals Council of Australia* (MCA), dan *Nickel Institute*. Dengan demikian, harapan untuk mematuhi GISTM sudah mapan di Australia, Asia Timur, dan industri pertambangan nikel dan kobalt.

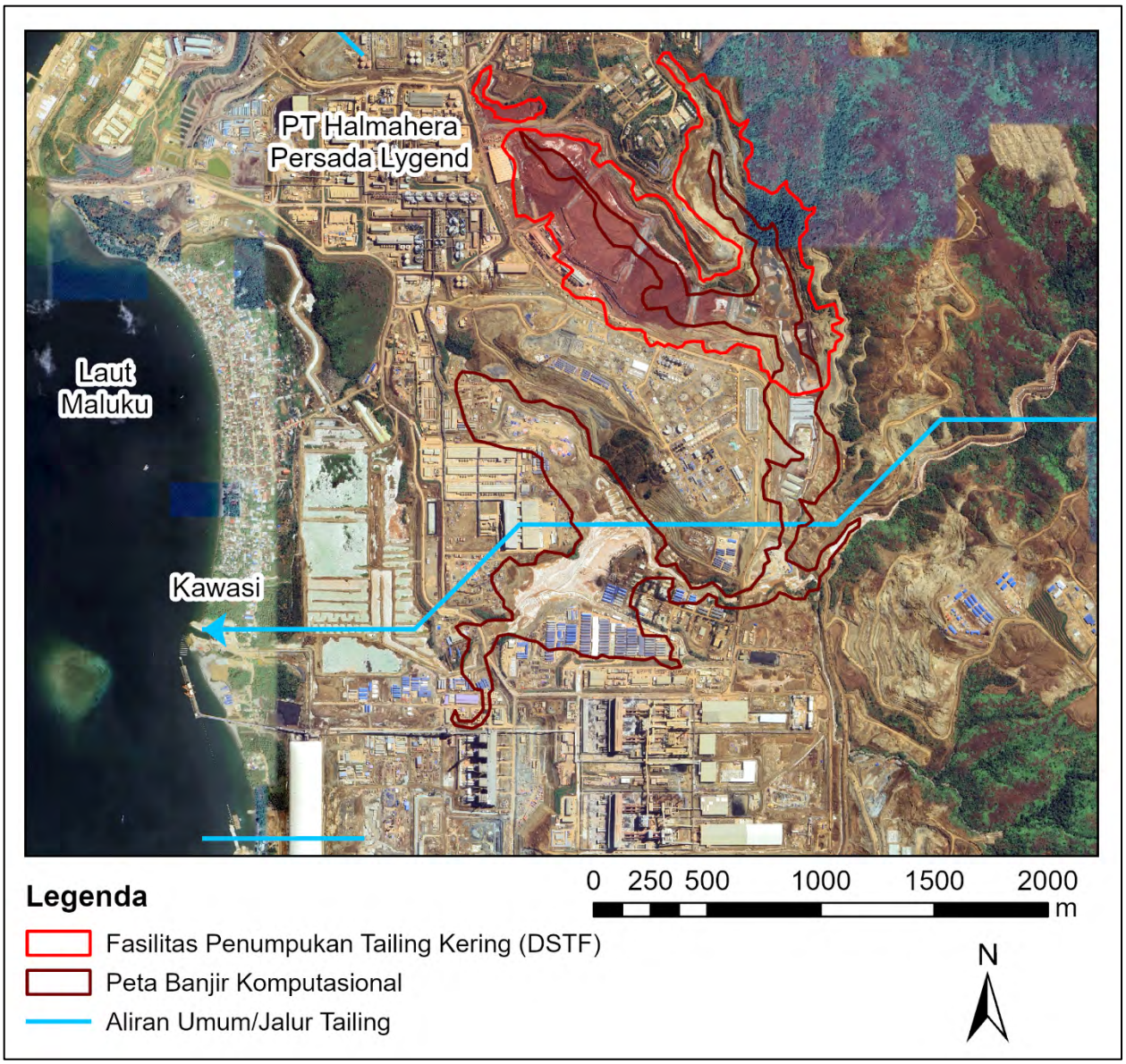
Ketidakrealistisan dalam Analisis Kerusakan Bendungan

SRK Consulting (2022a) mencetak ulang sebuah peta dari PT Lapi ITB (2020) yang menunjukkan area yang akan tergenang oleh tailing apabila terjadi kegagalan katastrofik pada DSTF di proyek PT HPL (lihat). PT Lapi ITB (2020) menjelaskan bahwa area genangan dikembangkan menggunakan model deterministik yang mengasumsikan bahwa tailing telah sepenuhnya mengalami likuifaksi, namun tidak memberikan penjelasan mengenai asumsi-asumsi dan parameter input lainnya dalam model tersebut. Menurut PT Lapi ITB (2020), "Pendekatan penilaian risiko kegagalan DSTF dilakukan melalui simulasi analisis jebolnya bendungan (*DAM break analysis*). Meskipun material tailing merupakan material padat dan bukan material yang mengalami likuifaksi, penilaian risiko dibuat sangat konservatif dengan mengasumsikan bahwa

material tailing bersifat cair. Analisis jebol bendungan dilakukan melalui simulasi numerik berdasarkan perkiraan volume dan aliran; model menghitung kedalaman yang dicapai oleh aliran puncak berdasarkan geometri saluran, kemiringan, dan koefisien kekasaran." Deskripsi tailing sebagai "material yang tidak mengalami likuifaksi" bertentangan dengan pembahasan yang luas mengenai potensi likuifaksi dan ketidakstabilan seismik yang tersedia dalam dokumen yang sama, serta dalam Hatch (2020), dan yang telah dibahas sebelumnya dala m subbagian "Kerentanan terhadap Likuifaksi" (lihat Gambar 30a-b dan 32a-d). PT Lapi ITB (2020) melanjutkan, "Hasil simulasi menunjukkan jarak maksimum dari lokasi kegagalan DSTF adalah sekitar 2,2 km ke arah hilir dari lokasi DSTF."

SRK Consulting (2022a) menggambarkan metodologi analisis jebolnya bendungan sebagai "Tidak dijelaskan," namun mengonfirmasi bahwa "Material tailing dianggap cair, yang akan menghasilkan massa terdampak lebih besar dibandingkan jika dinilai sebagai massa padat" dan bahwa "jarak maksimum yang dicapai" adalah 2200 meter. SRK Consulting (2022a) juga menyatakan bahwa "Desa Kawasi [lihat Gambar 34] tidak terdampak, namun beberapa area pertambangan (Toba) terganggu." Terakhir, SRK Consulting (2022a) menyebutkan bahwa baik "Jumlah orang yang berisiko (PAR)" maupun "Potensi kehilangan jiwa (PLL)" dinyatakan sebagai "Tidak dilaporkan." Faktanya, PT Lapi ITB (2020) tidak membahas ancaman terhadap manusia, termasuk pekerja tambang, dan hanya menyoroti potensi dampak terhadap infrastruktur. Menurut PT Lapi ITB (2020), "Area terdampak tidak mencapai lokasi komunitas (Desa Kawasi), dan tidak terdapat bangunan atau aset penting yang termasuk dalam area terdampak."

SRK Consulting menunjukkan pengabaian kehati-hatian yang serius dalam melakukan uji kelayakan dengan menerima begitu saja peta genangan dari PT Lapi ITB (2020) (lihat Gambar 34). Pertama, meskipun PT Lapi ITB (2020) tidak memberikan parameter input apa pun, kekuatan sisa (*residual strength*) dari tailing yang mengalami likuifaksi merupakan parameter yang sangat krusial, dan SRK Consulting (2022a) sendiri telah mencatat bahwa kekuatan sisa tersebut belum pernah diukur. Kedua, jarak sebar hanya 2200 meter sangat tidak sebanding dengan sejarah kegagalan katastrofik fasilitas penyimpanan tailing (lihat Tabel 3 dan Gambar 19b). Berdasarkan model statistik untuk kegagalan katastrofik fasilitas penyimpanan tailing yang telah dibahas dalam bagian "Tutorial" dan volume penyimpanan sebesar 25,8 juta meter kubik, dalam skenario paling mungkin, runtuhnya DSTF akan melepaskan 8,4 juta meter kubik tailing (33% dari volume penyimpanan) (lihat Gambar 19a). Model statistik ini harus dianggap sangat andal dalam kasus DSTF PT HPL karena volume penyimpanannya sebesar 25,8 juta meter kubik berada dalam rentang data yang digunakan untuk membangun model statistik tersebut (lihat Gambar 19a). Dengan tinggi fasilitas sebesar 57 meter, model ini memprediksi jarak sebar (*runout distance*) sejauh 47 kilometer dalam skenario paling mungkin (pelepasan 33% dari volume penyimpanan) dan 161 kilometer dalam skenario terburuk (pelepasan 100% dari volume penyimpanan) (lihat Gambar 19b). Model statistik ini sekali lagi dapat dianggap sangat andal karena volume penyimpanan dan tinggi DSTF sesuai dengan dataset yang digunakan untuk mengembangkan model runout tersebut. Dengan demikian, kesimpulan bahwa tailing yang tumpah akan mencapai Laut Maluku (lihat Gambar 34) menjadi tak terelakkan.



Gambar 34. Sebuah model komputasi oleh konsultan untuk Harita Nickel menunjukkan jarak sebar sejauh 2200 meter setelah runtuhnya Fasilitas Penyimpanan Tailing Kering (DSTF) dengan asumsi bahwa tailing mengalami likuifaksi. Sebaliknya, berdasarkan model statistik dari kegagalan fasilitas tailing di masa lalu, tinggi fasilitas (57 meter) dan volume penyimpanan (25,8 juta meter kubik) memprediksi jarak sebar sejauh 47 kilometer (lihat Gambar 19b), yang akan dengan mudah membawa tailing hingga ke laut. Jarak terbatas dan pola genangan yang tidak beraturan dalam model komputasi kemungkinan besar disebabkan oleh model topografi yang keliru, yang menciptakan hambatan aliran fiktif. Skenario yang paling mungkin adalah bahwa tailing akan masuk ke sungai kecil tanpa nama yang terletak kurang dari 600 meter di bawah DSTF, kemudian mengalir ke arah barat menuju Laut Maluku, melintasi berbagai infrastruktur pertambangan dan meluap keluar dari saluran sungai hingga ke desa Kawasi. Perlu dicatat adanya sedikit pergeseran antara aliran sungai umum dari HydroSheds (2025) dan citra Google Earth dari 6 Agustus dan 20 November 2023. Bahkan tanpa likuifaksi awal, runtuhnya DSTF akan membawa tailing ke sungai tersebut, yang pada titik itu akan berubah menjadi massa yang sepenuhnya terfluidisasi. Batas Fasilitas Penyimpanan Tailing Kering diambil dari PT Lapi ITB (2022) dan batas peta genangan komputasi dari PT Lapi ITB (2020).

Pertimbangan ketiga adalah bahwa area genangan bertemu dengan sungai yang mengalir ke arah barat sekitar 570 meter dari kaki fasilitas penyimpanan tailing yang difilter sepanjang jalur aliran tailing (lihat Gambar 34). Dengan demikian, prediksi yang paling masuk akal adalah bahwa tailing akan mencapai sungai tersebut dan kemudian mengalir sejauh 1600 meter ke arah barat menuju Laut Maluku di sebelah selatan desa Kawasi, melintasi sejumlah besar infrastruktur pertambangan (lihat Gambar 34). Oleh karena itu, potensi dampak terhadap para pekerja tambang di proyek PT HPL maupun tambang-tambang lain perlu diperhitungkan, begitu pula dengan potensi meluapnya aliran sungai ke desa Kawasi. Sumber kesalahan yang paling mungkin dalam model deterministik dapat ditelusuri dari pola genangan yang tidak beraturan pada area genangan yang diprediksi (lihat Gambar 34). Pola genangan tidak beraturan semacam ini biasanya diakibatkan oleh model topografi yang keliru, yang menciptakan hambatan aliran yang tidak nyata. Misalnya, model topografi tersebut mungkin memasukkan elevasi jembatan sebagai bagian dari topografi alami, sehingga dari sudut pandang model komputasi, jembatan tersebut dianggap menghalangi aliran sungai.

Meskipun analisis jebolnya bendungan mengasumsikan bahwa tailing sepenuhnya mengalami likuifaksi, kemungkinan besar tailing akan tetap mengalir ke Laut Maluku bahkan tanpa likuifaksi awal. Seperti yang telah ditunjukkan dalam bagian "Tutorial", berdasarkan kasus kegagalan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Brasil pada Januari 2022 dan Desember 2024, longsoran padat tailing yang difilter tanpa likuifaksi dapat mengalir sejauh sekitar 20 kali tinggi timbunan tailing tersebut. Dalam kasus DSTF di proyek PT HPL, tinggi timbunan sebesar 57 meter berarti bahwa tailing yang dilepaskan akan mengalir sekitar 1140 meter bahkan tanpa likuifaksi. Karena sungai terdekat hanya berjarak 570 meter dari kaki DSTF (lihat Gambar 34), maka tailing yang dilepaskan akan segera menjadi massa yang sepenuhnya terlikuidasi begitu bercampur dengan air sungai, dan kemudian tailing yang terlikuidasi tersebut akan mengalir ke Laut Maluku (lihat Gambar 34).

Genangan Permukaan dan Pembiaran

Tujuan dari subbagian ini adalah untuk memberikan bukti tambahan mengenai potensi kegagalan katastrofik yang akan segera terjadi pada DSTF, serta contoh tindakan yang diambil oleh SRK Consulting untuk secara drastis mengecilkan bukti-bukti permasalahan serius pada DSTF. Revisi 1 dari laporan tahun 2022 oleh SRK Consulting (2022b) menyertakan sebuah foto besar (setengah halaman) dengan judul "Pemandangan area DSTF dengan area dengan banyak genangan air" (lihat Gambar 35a). SRK Consulting (2022b) menafsirkan genangan permukaan tersebut sebagai risiko besar terhadap likuifaksi. Menurut SRK Consulting (2022b), "Selama kunjungan lapangan, tampak beberapa permasalahan terkait genangan air dan buruknya sistem drainase (Gambar 9–11) … Desain awal mempertimbangkan bahwa pemadatan yang dilakukan pada tailing akan cukup untuk mencegah likuifaksi; namun, menurut pendapat SRK, dengan mempertimbangkan tinggi fasilitas (57 m), kurangnya pengendalian mutu dalam penempatan tailing, serta permasalahan air permukaan yang teramati, diperlukan studi lanjutan untuk menilai risiko tailing menunjukkan perilaku kontraktif selama geseran tak terkuras" (penekanan ditambahkan). Foto di atas secara bertahap diperkecil ukurannya, sedangkan judul dan interpretasinya dihapus seluruhnya dalam rangkaian revisi laporan (lihat Gambar 35b–e). Sebelum menelaah suntingan pada serangkaian draf laporan yang mengecilkan permasalahan di DSTF, penting untuk terlebih dahulu membahas mengapa genangan permukaan merupakan isu yang penting.

Figure 9-11: View of DSTF area with significant water ponding

Source: SRK site visit

Gambar 35a. Revisi pertama dari laporan tahun 2022 oleh SRK Consulting (2022b) menyertakan sebuah foto besar dengan judul "Pemandangan area DSTF dengan area dengan banyak genangan air." Genangan permukaan merupakan permasalahan yang sangat serius bagi fasilitas penyimpanan tailing yang difilter karena air yang menggenang dapat menyebabkan erosi dan pengikisan (pembentukan parit) pada timbunan tailing yang difilter, serta karena area yang tergenang tidak dapat dilalui kendaraan. Lebih jauh lagi, genangan air meningkatkan kemungkinan bahwa seluruh timbunan telah jenuh dan dapat mengalami likuifaksi, sementara air di permukaan akan mempercepat aliran tailing jika terjadi keruntuhan. Menurut SRK Consulting (2022b), "Selama kunjungan lapangan, tampak beberapa permasalahan terkait genangan air dan buruknya sistem drainase (Gambar 9–11) … Desain awal mempertimbangkan bahwa pemadatan yang dilakukan pada tailing akan cukup untuk mencegah likuifaksi; namun, menurut pendapat SRK, dengan mempertimbangkan tinggi fasilitas (57 m), kurangnya pengendalian mutu dalam penempatan tailing, serta permasalahan air permukaan yang teramati, diperlukan studi lanjutan untuk menilai risiko tailing menunjukkan perilaku kontraktif selama geseran tak terkuras" (penekanan ditambahkan). Salah satu cara sederhana untuk menilai apakah seluruh timbunan mungkin telah jenuh adalah dengan menanyakan apakah genangan air permukaan masih bertahan setelah hujan berhenti. Namun, SRK Consulting tidak menyertakan informasi tentang lamanya genangan air bertahan dalam laporan tahun 2022 mereka. Foto dari SRK Consulting (2022b).

Figure 8-6: DSFT operation

Source: SRK site visit

Note: A: filter presses, B: Conveyor belt with filtered material, C: View of conveyors and earthmoving plant and D: View of DSTF area with water ponding issue

Gambar 35b. Foto besar dengan judul "Pemandangan area DSTF dengan area dengan banyak genangan air" dalam revisi pertama laporan tahun 2022 oleh SRK Consulting (2022b) diperkecil secara signifikan dalam dokumen lanjutan dari revisi pertama (SRK Consulting, 2022c), dan keterangannya diubah menjadi "Pemandangan area fasilitas tailing kering dengan permasalahan genangan air." Namun, fotonya tetap identik. Dokumen lanjutan tersebut tetap menyatakan, "Selama kunjungan lapangan, tampak beberapa permasalahan terkait genangan air dan sistem drainase … Desain awal mempertimbangkan bahwa pemadatan yang dilakukan pada tailing akan cukup untuk mencegah likuifaksi; namun, menurut pendapat SRK, dengan mempertimbangkan tinggi fasilitas (57 m), kurangnya pengendalian mutu dalam penempatan tailing, serta permasalahan air permukaan yang teramati, diperlukan studi lanjutan untuk menilai risiko tailing menunjukkan perilaku kontraktif selama geseran tak terkuras" (penekanan ditambahkan). Foto, keterangan, dan kutipan di atas dalam SRK Consulting (2022c) tetap tidak berubah hingga Revisi 8 (SRK Consulting, 2022e), kecuali bahwa "DSTF" diubah menjadi "fasilitas tailing kering" dalam keterangan foto, dan "buruknya sistem drainase" diubah menjadi "sistem drainase" dalam kutipan. Foto dari SRK Consulting (2022c).

Figure 7-6: Dry stack tailings facility operation

Source: SRK site visit

Note: A: filter presses, B: Conveyor belt with filtered material, C: View of conveyors and earthmoving plant and D: View of dry stack tailings facility area

Gambar 35c. Dalam Revisi 8A, keterangan foto pada revisi-revisi sebelumnya yang menyatakan "Pemandangan area fasilitas tailing kering dengan permasalahan genangan air" (lihat Gambar 35b) diubah menjadi "Pemandangan area fasilitas tailing kering" tanpa perubahan apa pun pada fotonya. Dalam kutipan dari Revisi 8 yang berbunyi, "Selama kunjungan lapangan, tampak beberapa permasalahan terkait genangan air dan sistem drainase … Desain awal mempertimbangkan bahwa pemadatan yang dilakukan pada tailing akan cukup untuk mencegah likuifaksi; namun, menurut pendapat SRK, dengan mempertimbangkan tinggi fasilitas (57 m), kurangnya pengendalian mutu dalam penempatan tailing, serta permasalahan air permukaan yang teramati, diperlukan studi lanjutan untuk menilai risiko tailing menunjukkan perilaku kontraktif selama geseran tak terkuras" (penekanan ditambahkan) (SRK Consulting, 2022e), kalimat "Selama kunjungan lapangan, tampak beberapa permasalahan terkait genangan air dan sistem drainase" dihapus, begitu pula frasa "serta permasalahan air permukaan yang teramati," yang sebenarnya membuat kalimat terakhir menjadi tidak lengkap secara tata bahasa. Foto, keterangan, dan kutipan tersebut tetap tidak berubah hingga revisi akhir (SRK Consulting, 2022a), kecuali bahwa kutipannya diperbaiki agar menjadi tata bahasa yang benar: "Desain awal mempertimbangkan bahwa pemadatan yang dilakukan pada tailing akan cukup untuk mencegah likuifaksi; namun, menurut pendapat SRK, dengan mempertimbangkan tinggi fasilitas (57 m) dan kurangnya pengendalian mutu dalam penempatan tailing, diperlukan studi lanjutan untuk menilai risiko tailing menunjukkan perilaku kontraktif selama geseran tak terkuras." Foto dari SRK Consulting (2022f).

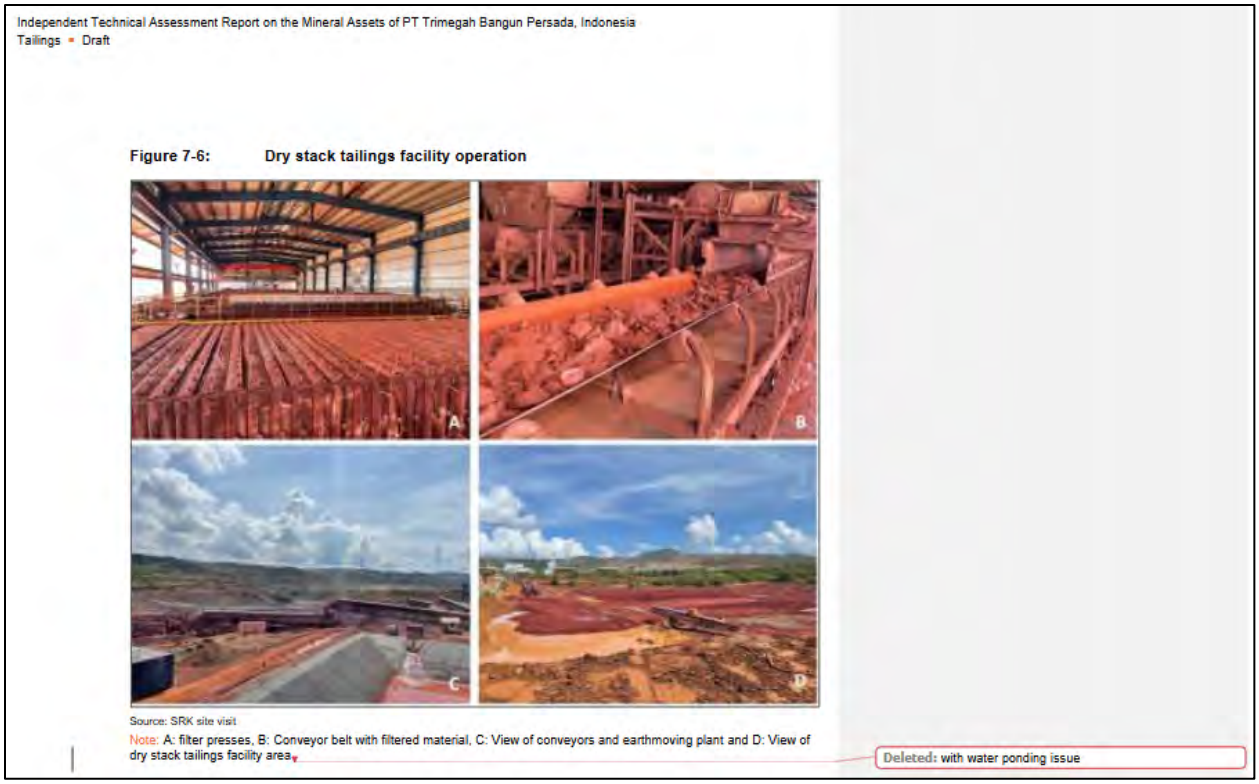

Independent Technical Assessment Report on the Mineral Assets of PT Trimegah Bangun Persada, Indonesia
Tailings ▪ Draft

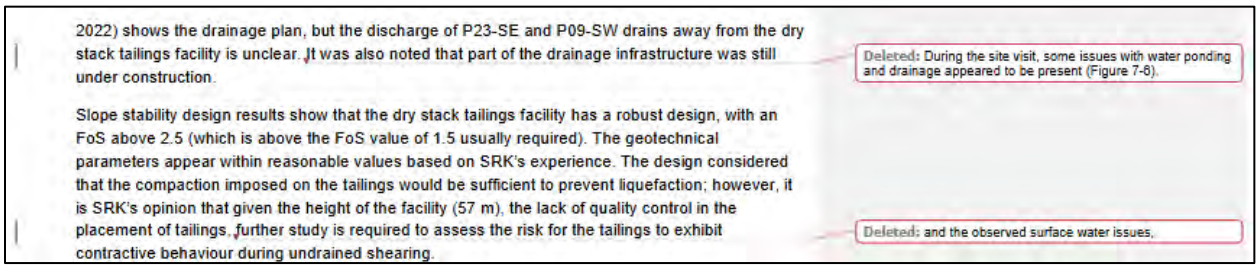
Figure 7-6: Dry stack tailings facility operation

Source: SRK site visit

Note: A: filter presses, B: Conveyor belt with filtered material, C: View of conveyors and earthmoving plant and D: View of dry stack tailings facility area.

Deleted: with water ponding issue

Gambar 35d. Versi Track Changes yang membandingkan Revisi 8A dengan Revisi 8 memperjelas perubahan yang telah dilakukan. Pertama, frasa "dengan permasalahan genangan air" dihapus dari keterangan foto. Lihat perubahan tambahan pada Gambar 35e. Foto dengan perubahan dari SRK Consulting (2022g).


2022) shows the drainage plan, but the discharge of P23-SE and P09-SW drains away from the dry stack tailings facility is unclear. It was also noted that part of the drainage infrastructure was still under construction.

Slope stability design results show that the dry stack tailings facility has a robust design, with an FoS above 2.5 (which is above the FoS value of 1.5 usually required). The geotechnical parameters appear within reasonable values based on SRK's experience. The design considered that the compaction imposed on the tailings would be sufficient to prevent liquefaction; however, it is SRK's opinion that given the height of the facility (57 m), the lack of quality control in the placement of tailings, further study is required to assess the risk for the tailings to exhibit contractive behaviour during undrained shearing.

Deleted: During the site visit, some issues with water ponding and drainage appeared to be present (Figure 7-8).

Deleted: and the observed surface water issues,

Gambar 35e. Versi Track Changes yang membandingkan Revisi 8A dengan Revisi 8 memperlihatkan perubahan lain yang telah dilakukan. Yakni, kalimat "Selama kunjungan lapangan, tampak beberapa permasalahan terkait genangan air dan sistem drainase (Gambar 7–8)" dan frasa "serta permasalahan air permukaan yang teramati" dihapus. Lihat pula perubahan pada keterangan foto di Gambar 35d. Teks dengan perubahan dari SRK Consulting (2022g).

Genangan permukaan merupakan permasalahan yang sangat serius bagi fasilitas penyimpanan tailing yang difilter karena air yang menggenang dapat menyebabkan erosi dan pengikisan (pembentukan parit) pada timbunan tailing yang difilter. Dalam hal ini, setelah "Kegagalan fasilitas tailing kering," SRK Consulting (2022a) mencantumkan "Erosi pada fasilitas tailing kering" dan "Air kontak yang meluap" sebagai risiko kedua dan ketiga dari daftar "Risiko tidak terkendali." Area dengan genangan air juga tidak dapat dipadatkan karena tidak dapat dilalui kendaraan berat. Bahkan jika alat berat dapat melewati area tersebut, tailing di bawah permukaan genangan akan jenuh air sehingga tidak dapat dipadatkan dengan baik. Usaha untuk memadatkan material yang jenuh air atau yang jauh lebih basah daripada kadar air

optimum untuk pemadatan maksimum dapat menghasilkan material dengan kekuatan geser yang sangat rendah (Holtz et al., 2011), yang pada akhirnya mengurangi kestabilan. Oleh karena itu, tailing yang baru ditempatkan tidak akan dapat dipadatkan secara memadai bahkan jika air permukaan dipindahkan dari satu bagian timbunan tailing ke bagian lain untuk memungkinkan pergerakan alat berat. Selain itu, tailing yang jenuh berpotensi mengalami likuifaksi, terutama jika tidak pernah dipadatkan dengan benar. Terakhir, jika timbunan tailing yang difilter mengalami keruntuhan, keberadaan air bebas di permukaan akan mempercepat aliran tailing yang terlepas.

Secara keseluruhan, genangan permukaan merupakan indikasi adanya konstruksi yang tidak tepat pada timbunan tailing yang difilter. Genangan ini dapat terjadi akibat proses pemfilteran tailing yang tidak sempurna (sehingga kadar air terlalu tinggi), atau karena penumpukan tailing dilakukan saat curah hujan tinggi (yang bisa disebabkan oleh tidak tersedianya ruang penyimpanan sementara saat musim hujan). Genangan juga dapat terjadi akibat permukaan yang tidak cukup miring untuk mengalirkan air. Menurut pedoman tailing difilter dari Konsorsium Pengelolaan Tailing BHP Rio Tinto (2024), "Kemiringan permukaan yang positif sangat penting untuk mencegah genangan air di atas permukaan timbunan tailing difilter, yang dapat menyebabkan peningkatan rembesan, berdampak pada stabilitas melalui kenaikan muka air freatik, atau menyulitkan lalu lintas alat berat." Akhirnya, genangan permukaan dapat disebabkan oleh kurangnya infrastruktur drainase dalam timbunan tailing yang difilter. Dalam hal ini, berbagai catatan dari SRK Consulting (2022a) mengenai bagian-bagian dari sistem drainase yang belum dibangun juga perlu diperhatikan, termasuk pernyataan mereka bahwa beberapa bagian dari desain sistem drainase tersebut tidak masuk akal (lihat Gambar 26).

Permasalahan yang paling serius adalah bahwa keberadaan genangan permukaan menimbulkan kemungkinan bahwa seluruh timbunan tailing yang difilter telah jenuh air dari atas hingga bawah. Menurut PT Lapi ITB (2020), DSTF harus dinaikkan ke Tingkat Darurat 1, 2, dan 3, apabila muka air tanah naik hingga 25%, 50%, atau 80% dari tinggi timbunan (lihat Gambar 36). Tingkat Darurat 1 berarti "Kondisi yang tidak memerlukan tanggap darurat namun memerlukan investigasi dan penyelesaian segera" (PT Lapi ITB, 2020). Tingkat Darurat 2 berarti "Berpotensi menjadi kondisi darurat jika dibiarkan berkelanjutan; diperlukan rencana penanganan" (PT Lapi ITB, 2020). Tingkat Darurat 3 berarti "Kegagalan segera atau aktual yang memerlukan evakuasi sebagian atau seluruhnya, komunikasi darurat, dan langkah-langkah penanganan" (PT Lapi ITB, 2020). Oleh karena itu, hanya dengan mengamati adanya genangan permukaan saja sudah menimbulkan kemungkinan bahwa DSTF memerlukan penanganan darurat yang bisa mencakup evakuasi wilayah hilir.

Ketinggian muka air tanah di dalam DSTF seharusnya dapat diketahui menggunakan piezometer (alat yang mengukur tinggi muka air dan tekanan pori) yang dipasang di DSTF, tetapi SRK Consulting (2022b) juga menyatakan bahwa tidak terdapat piezometer ataupun instrumen pemantauan lainnya. Namun, penyelidikan tentang apakah genangan permukaan tetap ada setelah hujan berhenti merupakan cara sederhana lainnya untuk mulai menilai sejauh mana permasalahan ini. Keberlanjutan genangan selama berjam-jam atau bahkan berhari-hari setelah hujan berhenti merupakan tanda yang sangat berbahaya karena bisa menunjukkan bahwa timbunan tailing yang difilter telah jenuh sepenuhnya dan tidak mengalami drainase sama sekali. Laporan SRK Consulting (2022a) tidak memberikan jawaban atas pertanyaan mengenai apakah genangan air tetap bertahan setelah hujan reda.

Table VII-6 Threshold Value from Monitoring Instrument

Monitoring instrument	Threshold value	Emergency level
Piezometer	25% drystack height	1
	50% drystack height	2
	80% drystack height	3
Channel (Weir)	50% weir height	1
	75% weir height	2
	100% weir height	3
Point Survey (RTK)	0.2 mm/hr	1
	1 mm/hr	2
	1.5 mm/hr	3

Gambar 36. Menurut laporan konsultan oleh PT Lapi ITB (2020), Fasilitas Penyimpanan Tailing Kering (DSTF) harus dinaikkan ke Tingkat Darurat 1, 2, dan 3 apabila muka air tanah naik hingga masing-masing 25%, 50%, atau 80% dari tinggi timbunan. Tingkat Darurat 1 berarti "Kondisi yang tidak memerlukan tanggap darurat namun memerlukan investigasi dan penyelesaian segera." Tingkat Darurat 2 berarti "Berpotensi menjadi kondisi darurat jika dibiarkan berkelanjutan; diperlukan rencana penanganan." Tingkat Darurat 3 berarti "Kegagalan segera atau aktual yang memerlukan evakuasi sebagian atau seluruhnya, komunikasi darurat, dan langkah-langkah penanganan." Oleh karena itu, keberadaan genangan permukaan (lihat Gambar 35a–d) menimbulkan kemungkinan bahwa seluruh timbunan sudah jenuh air, yang akan menempatkan fasilitas tailing pada Tingkat Darurat tertinggi, yaitu Tingkat 3. Tabel dari PT Lapi ITB (2020).

Berdasarkan informasi yang tersedia, tampaknya SRK Consulting tidak mengidentifikasi penyebab atau berbagai penyebab genangan permukaan tersebut. SRK Consulting memang mengamati adanya genangan dan permasalahan drainase yang mencolok, tetapi draf laporan mereka berikutnya justru menghapus bahasa-bahasa kunci yang menyoroti risiko besar dari permasalahan ini terhadap DSTF. Dalam dokumen lanjutan dari Revisi 1 (disebut Rev1_Draft) (SRK Consulting, 2022c), foto besar yang menunjukkan genangan air dalam Revisi 1 (lihat Gambar 35a) dikecilkan menjadi seperempat dari ukuran sebelumnya (lihat Gambar 35b). Judul "Pemandangan area DSTF dengan area dengan banyak genangan air" (SRK Consulting, 2022b; lihat Gambar 35a) diubah menjadi keterangan foto yang lebih ringan, yaitu "Pemandangan area DSTF dengan permasalahan genangan air" (SRK Consulting, 2022c; lihat Gambar 35b). Selain ukuran dan judul, foto tersebut identik dalam kedua versi tersebut (bandingkan Gambar 35a–b). Dokumen lanjutan dari Revisi 1 masih memuat pernyataan, "Selama kunjungan lapangan, tampak beberapa permasalahan terkait genangan air dan sistem drainase … Desain awal mempertimbangkan bahwa pemadatan yang dilakukan pada tailing akan cukup untuk mencegah likuifaksi; namun, menurut pendapat SRK, dengan mempertimbangkan tinggi fasilitas (57 m), kurangnya pengendalian mutu dalam penempatan tailing, serta permasalahan air permukaan

yang teramati, diperlukan studi lanjutan untuk menilai risiko tailing menunjukkan perilaku kontraktif selama geseran tak terkuras" (penekanan ditambahkan) (SRK Consulting, 2022c). Foto, keterangan, dan kutipan di atas dalam SRK Consulting (2022c) tidak mengalami perubahan hingga Revisi 8 (SRK Consulting, 2022e), kecuali bahwa "DSTF" diganti menjadi "fasilitas tailing kering" dalam keterangan foto dan "buruknya sistem drainase" dilunakkan menjadi "sistem drainase" dalam kutipan.

Perubahan besar terjadi dalam transisi dari Revisi 8 (SRK Consulting, 2022e) ke Revisi 8A (SRK Consulting, 2022f). Dalam Revisi 8A, keterangan foto dalam versi-versi sebelumnya yang berbunyi "Pemandangan area DSTF dengan permasalahan genangan air" (SRK Consulting, 2022c; lihat Gambar 35b) atau "Pemandangan area fasilitas tailing kering dengan permasalahan genangan air" (SRK Consulting, 2022e) diubah menjadi "Pemandangan area fasilitas tailing kering" (SRK Consulting, 2022f; lihat Gambar 35c), tanpa ada perubahan pada foto. Dengan demikian, pengamatan terhadap genangan permukaan dihilangkan sepenuhnya. Dalam kutipan dari Revisi 8 yang menyatakan, "Selama kunjungan lapangan, tampak beberapa permasalahan terkait genangan air dan sistem drainase … Desain awal mempertimbangkan bahwa pemadatan yang dilakukan pada tailing akan cukup untuk mencegah likuifaksi; namun, menurut pendapat SRK, dengan mempertimbangkan tinggi fasilitas (57 m), kurangnya pengendalian mutu dalam penempatan tailing, serta permasalahan air permukaan yang teramati, diperlukan studi lanjutan untuk menilai risiko tailing menunjukkan perilaku kontraktif selama geseran tak terkuras" (penekanan ditambahkan) (SRK Consulting, 2022e), kalimat "Selama kunjungan lapangan, tampak beberapa permasalahan terkait genangan air dan sistem drainase" dihapus, begitu pula frasa "serta permasalahan air permukaan yang teramati," yang menyebabkan kalimat tersebut menjadi tidak gramatikal. Dengan demikian, semua penyebutan mengenai pengamatan terhadap genangan permukaan, serta signifikansi dari genangan tersebut, dihapus dari Revisi 8A (SRK Consulting, 2022f). Kutipan lengkap dalam Revisi 8A berbunyi, "Desain awal mempertimbangkan bahwa pemadatan yang dilakukan pada tailing akan cukup untuk mencegah likuifaksi; namun, menurut pendapat SRK, dengan mempertimbangkan tinggi fasilitas (57 m), serta kurangnya pengendalian mutu dalam penempatan tailing, diperlukan studi lanjutan untuk menilai risiko tailing menunjukkan perilaku kontraktif selama geseran tak terkuras" (SRK Consulting, 2022f). Gambar 35d–e menampilkan versi Track Changes dari Revisi 8A (SRK Consulting, 2022g) yang memperjelas penghapusan kritis yang terjadi dalam transisi dari Revisi 8 ke Revisi 8A.

Satu-satunya perubahan pada kutipan tersebut dalam Revisi 9 yang merupakan versi final adalah perbaikannya agar menjadi gramatikal. Dengan demikian, Revisi 9 menyatakan, "Desain awal mempertimbangkan bahwa pemadatan yang dilakukan pada tailing akan cukup untuk mencegah likuifaksi; namun, menurut pendapat SRK, dengan mempertimbangkan tinggi fasilitas (57 m) serta kurangnya pengendalian mutu dalam penempatan tailing, diperlukan studi lanjutan untuk menilai risiko tailing menunjukkan perilaku kontraktif selama geseran tak terkuras." Singkatnya, pada akhir rangkaian revisi tersebut, tidak ada lagi penyebutan mengenai genangan permukaan maupun pembahasan mengenai dampaknya. Hanya foto yang tersisa, dengan ukuran seperempat dari versi awalnya pada Revisi 1 (bandingkan Gambar 35a dengan Gambar 35b–c). Pada titik ini, hanya pembaca yang sangat teliti yang akan menyadari keberadaan genangan air tersebut, kecuali jika mereka memiliki akses ke versi-versi laporan sebelumnya.

Kepatuhan terhadap Regulasi Indonesia

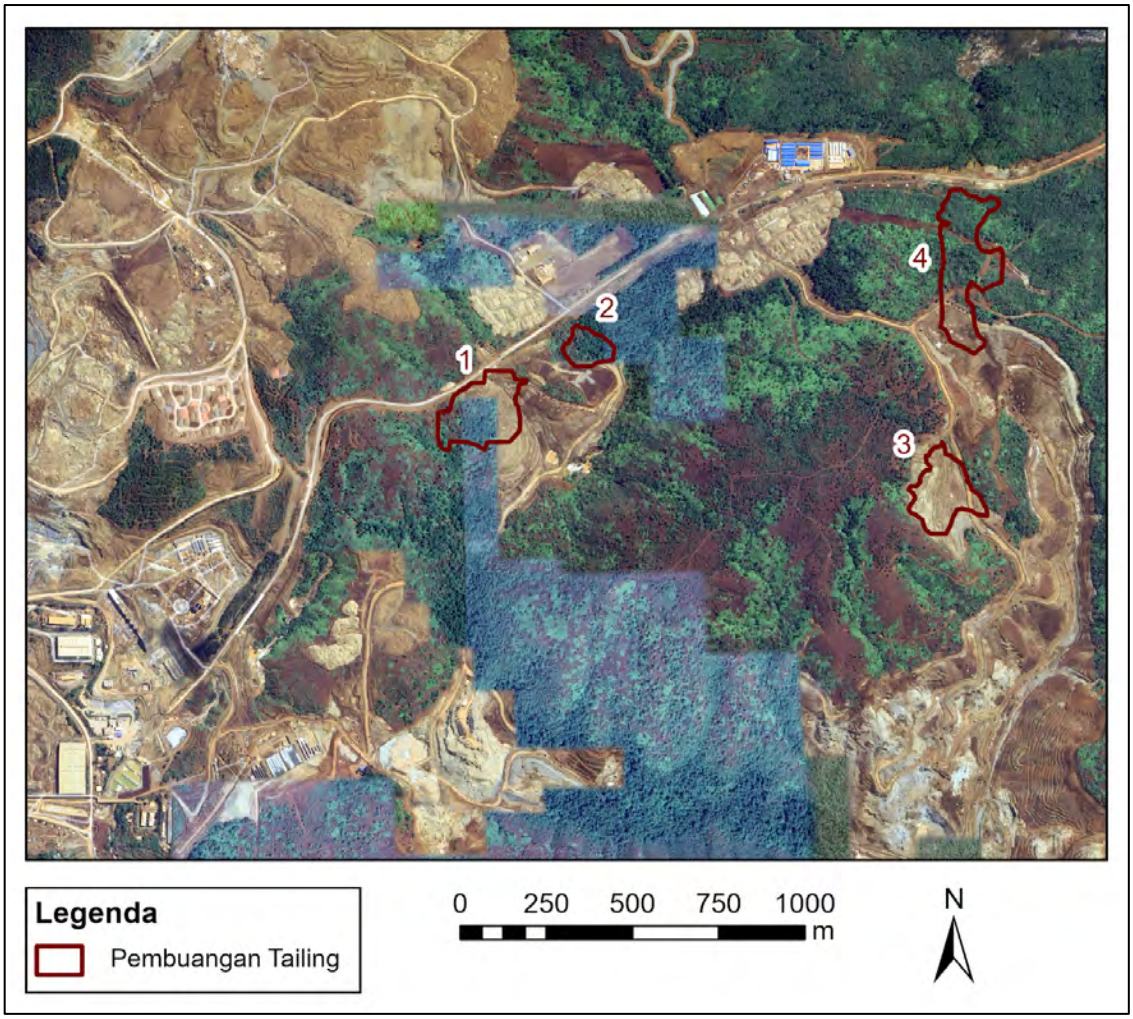
Kesimpulan yang disampaikan oleh SRK Consulting (2022a) adalah bahwa "Kedua fasilitas [pabrik pengolahan RKEF dan pabrik pengolahan HPAL] tampaknya secara umum telah mematuhi peraturan lokal pemerintah Indonesia." Namun, SRK Consulting (2022a) tidak merujuk pada regulasi Indonesia manapun, dan tidak melakukan perbandingan apa pun terhadap peraturan-peraturan tersebut. SRK Consulting (2022a) juga tidak menjelaskan bagaimana "kepatuhan umum" berbeda dengan "kepatuhan penuh." Pernyataan bahwa fasilitas tersebut patuh kemungkinan benar, tetapi harus diingat bahwa lemahnya standar dalam peraturan Indonesia, sebagaimana dibahas dalam bagian "Tutorial," menjadi faktor penting. Faktanya, satu-satunya standar yang berkaitan dengan pembuangan tailing di darat hanyalah kewajiban melakukan analisis konsekuensi jika bendungan jebol. Analisis ini memang dilakukan terhadap DSTF, meskipun dengan pendekatan yang tidak realistis (lihat Gambar 34). SRK Consulting (2022a) memang menyoroti kurangnya kepatuhan terhadap standar internasional dan merekomendasikan agar PT HPL "Melakukan kajian lanjutan untuk membuktikan kepatuhan terhadap GISTM [Global Industry Standard on Tailings Management] / ANCOLD [Australian National Committee on Large Dams] … [yang] seharusnya mencakup penilaian risiko berdasarkan kategori konsekuensi, analisis stabilitas, dan pengelolaan air permukaan."

Fasilitas Tailing yang Tidak Stabil

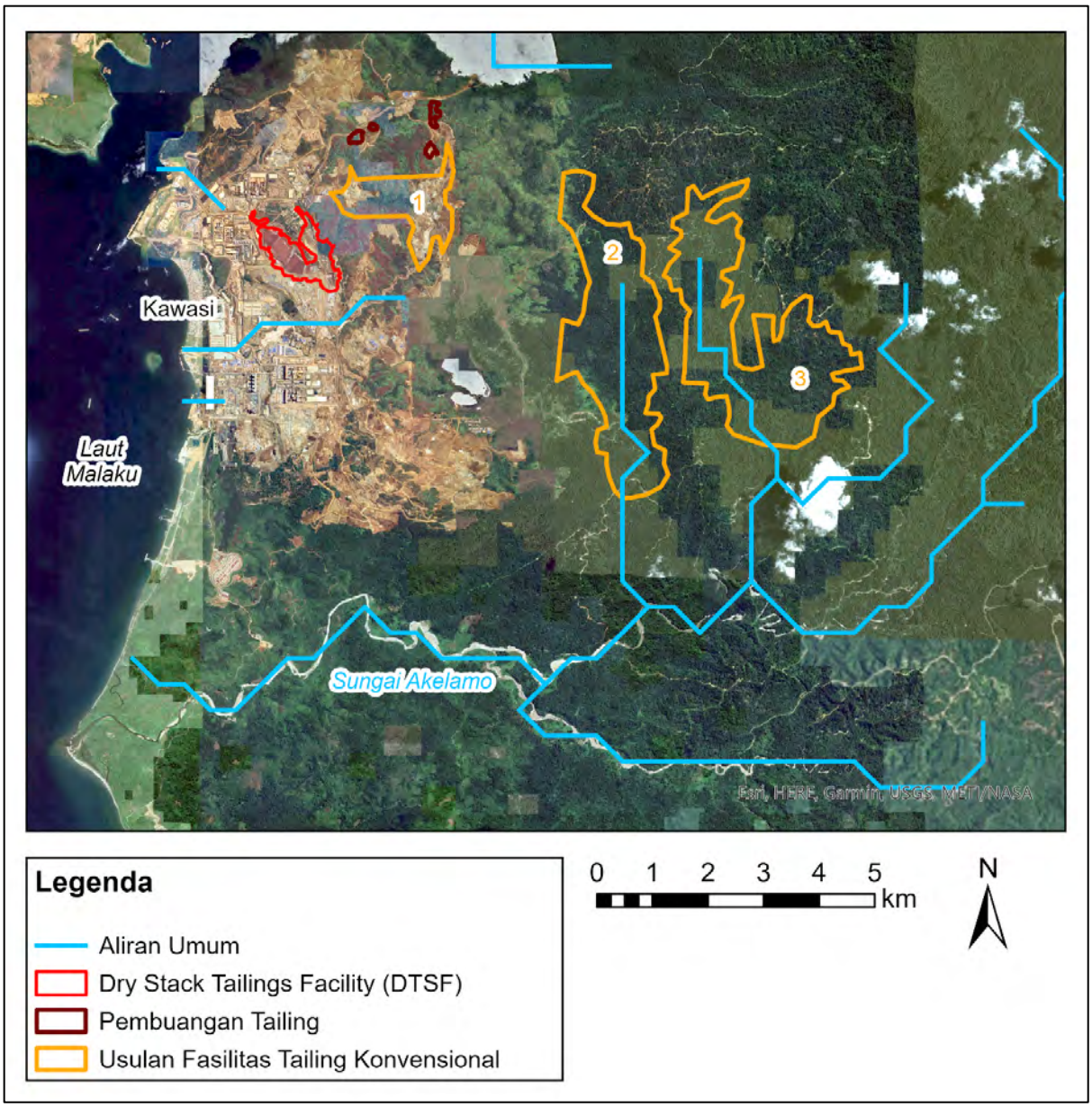
Sebuah memo internal berbahasa Indonesia dari Harita Nickel dan PT TBP (2023) tertanggal 31 Januari 2023, memuat informasi mengejutkan bahwa, selain Fasilitas Penyimpanan Tailing Kering (DSTF), terdapat setidaknya empat fasilitas penyimpanan tailing yang difilter lainnya yang terkait dengan proyek PT HPL (lihat Gambar 37–38). Tidak ada penyebutan mengenai fasilitas-fasilitas tambahan ini dalam dokumen resmi terkait proyek PT HPL, seperti laporan ESG atau keberlanjutan (PT Halmahera Persada Lygend, 2022, 2023, 2024; PT Trimegah Bangun Persada, 2023a). Keempat fasilitas tambahan ini terletak di barat laut DSTF dan di barat laut sebagian besar infrastruktur proyek PT HPL (lihat Gambar 37–38). Masing-masing fasilitas penyimpanan tailing yang difilter ini disebut sebagai "Disposal Tailing Dam" dalam teks memo, dan sebagai "WD Tailings Dump" dalam peta yang dilampirkan dalam memo tersebut (Harita Nickel dan PT TBP, 2023). Ungkapan "Tailings Disposal Dam" mungkin merupakan terjemahan bahasa Inggris yang lebih tepat secara tata bahasa. Arti dari "WD" tidak dijelaskan secara langsung, namun kemungkinan merupakan singkatan dari "*Waste Disposal*." Masing-masing fasilitas tailing ini juga disebut sebagai "*Dry Stack Tailing*" (Harita Nickel dan PT TBP, 2023), yang memperjelas bahwa fasilitas tersebut adalah fasilitas penyimpanan tailing yang difilter.

Keempat fasilitas tambahan ini dirancang dengan standar keselamatan yang jauh lebih lemah dibandingkan dengan DSTF. Menurut Harita Nickel dan PT TBP (2023), "Faktor Keamanan (FK) Minimum: FK Statis ≥ 1,3 dan FK Dinamis ≥ 1,05." Sebaliknya, DSTF dirancang dengan faktor keamanan statis minimum sebesar 1,5 dan faktor keamanan semu (seismik atau dinamis) minimum sebesar 1,1, yang sesuai dengan sebagian besar panduan dan regulasi internasional (lihat Gambar 31). Acuan untuk standar keselamatan yang lebih rendah adalah dokumen internal perusahaan HNG-TBP-EBI-39-021-SOP Pengelolaan Geoteknik, yang tidak tersedia bagi penulis. Faktor keamanan statis minimum yang lebih rendah tersebut mungkin mencerminkan regulasi tailing di Republik Rakyat Tiongkok, yang menetapkan bahwa fasilitas

tailing Kelas III (yakni fasilitas dengan tinggi antara 60–100 meter atau volume penyimpanan antara 10–100 juta meter kubik) memerlukan faktor keamanan statis minimum sebesar 1,30 (National Standards of the People's Republic of China, 2020). Regulasi Tiongkok tersebut bahkan mengizinkan faktor keamanan statis minimum serendah 1,25 untuk fasilitas tailing yang lebih kecil. (Terjemahan bahasa Inggris dari regulasi tailing Tiongkok tersedia dalam lampiran Emerman (2023b)). Penulis tidak mengetahui adanya regulasi atau dokumen panduan yang menyebutkan faktor keamanan semu minimum sebesar 1,05.



Gambar 37. Harita Nickel dan PT TBP (2023) membahas empat fasilitas penyimpanan tailing yang difilter yang berbeda dari Fasilitas Penyimpanan Tailing Kering (DSTF) milik PT HPL. Penomoran fasilitas penyimpanan tailing difilter dilakukan oleh penulis. Sebuah peta dalam dokumen Harita Nickel dan PT TBP (2023) memberi label masing-masing fasilitas sebagai "*WD Tailings Dump*," dan juga memberi label *Tailings Dump* #1 sebagai "*Karo Disposal Tailings Dump*." Menurut Harita Nickel dan PT TBP (2023), faktor keamanan *Tailings Dump* #1 adalah 1,045, yang berarti fasilitas tersebut berada di ambang kegagalan katastrofik. Harita Nickel dan PT TBP (2023) merekomendasikan agar tidak ada lagi tailing yang dibuang ke dalam *Tailings Dump* #1, tetapi tidak memberikan rekomendasi apa pun terkait keselamatan para pekerja tambang, meskipun *Tailings Dump* #1 hanya berjarak beberapa ratus meter di lereng atas dari infrastruktur pertambangan yang cukup besar. Jejak fasilitas tailing diambil dari peta dalam Harita Nickel dan PT TBP (2023). Latar belakang adalah citra *Google Earth* tanggal 6 Agustus 2023.



Gambar 38. PT Halmahera Persada Lygend (HPL) sedang mempertimbangkan pembangunan tiga fasilitas penampungan tailing konvensional untuk menampung tailing tambahan setelah Fasilitas Penampungan Tailing Tumpukan Kering (DSTF) mencapai kapasitas penuh pada pertengahan 2027. Dengan luas total 1.556 hektar, fasilitas penampungan tailing konvensional tersebut akan mencakup area delapan kali lipat dari luas DSTF yang ada saat ini. SRK Consulting (2022a) menyebut fasilitas penyimpanan tailing konvensional tersebut sebagai Fasilitas Penyimpanan Residu (RSF) dan menandai fasilitas yang diusulkan sebagai RSF 1, RSF 2, dan RSF 3. Per Desember 2022, fasilitas penyimpanan tailing konvensional tersebut sudah berada dalam tahap perizinan. Kehadiran RSF 2 dan RSF 3 di hulu Sungai Akelamo menunjukkan bahwa kegagalan bendungan tailing dapat mencemari seluruh Daerah Aliran Sungai (DAS) Akelamo. Lihat Gambar 34 dan 37 untuk tampilan skala kecil dari DSTF dan tumpukan tailing, masing-masing. Aliran sungai yang digeneralisasi dari HydroSHEDS (2025) dengan nama sungai dari Yasya dkk. (2024). DSTF, tumpukan tailing, dan fasilitas tailing konvensional yang diusulkan diambil dari peta di PT Lapi ITB (2022), Harita Nickel dan PT TBP (2023), serta SRK Consulting (2022a), masing-masing. Garis luar fasilitas tailing konvensional yang diusulkan bersifat perkiraan karena garis luar tersebut tertutupi oleh banyak label pada peta dalam SRK Consulting (2022a) (lihat Gambar 47). Latar belakang adalah citra Google Earth dari tanggal 31 Desember 2020 dan 6 Agustus 2023.

Banyak masalah yang sama seperti yang diuraikan oleh SRK Consulting (2022a) terkait DSTF, terutama menyangkut kurangnya pemantauan dan ketidakpatuhan terhadap desain, juga ditemukan pada keempat fasilitas penyimpanan tailing yang difilter lainnya. Menurut Harita Nickel dan PT TBP (2023),

"Dalam melakukan kajian kestabilan lereng aktual Disposal Tailing Dam, masih terdapat kemungkinan kegagalan geoteknik (kelongsoran) yang disebabkan oleh:

a. Keterbatasan parameter sifat fisik dan mekanik material; timbunan (*overburden*), & tanah dasar (limonit, saprolit, dan batuan dasar).
b. Keterbatasan informasi kondisi air tanah.
c. Praktek kerja yang tidak aman serta tidak mengikuti standar/kajian geoteknik yang berlaku (Faktor Operasional)."

Harita Nickel dan PT TBP (2023) juga menekankan perlunya kepatuhan terhadap desain maupun standar internal perusahaan. Menurut mereka, "Geometri lereng disposal yang tidak sesuai dengan geometri lereng timbunan rekomendasi perlu dibentuk *bench*/jenjang." Selain itu, Harita Nickel dan PT TBP menyoroti pentingnya membangun sistem drainase yang memadai untuk mencegah genangan air di permukaan, suatu rekomendasi yang seharusnya juga tercantum dalam tinjauan oleh SRK Consulting (2022a) (bandingkan dengan Gambar 35a–e). Menurut Harita Nickel dan PT TBP (2023), "Drainase yang baik diperlukan untuk mencegah arah aliran air menggenang pada badan timbunan tailing."

Harita Nickel dan PT TBP (2023) secara khusus menyoroti satu fasilitas penyimpanan tailing yang difilter, yang disebut sebagai "*Disposal Tailing Dam Karo*" (*Tailings Dump* #1 dalam Gambar 37). Menurut Harita Nickel dan PT TBP (2023), fasilitas penyimpanan tailing yang difilter tersebut berada di ambang kegagalan katastrofik dengan faktor keamanan statis hanya sebesar 1,045 (lihat Gambar 39). Rekomendasi dari Harita Nickel dan PT TBP (2023) adalah bahwa "Kegiatan dumping di area disposal ini tidak direkomendasikan untuk dilanjutkan kembali." Memo tersebut juga memuat rekomendasi mengenai perbaikan terhadap fasilitas penyimpanan tailing yang difilter, namun sangat disayangkan bahwa tidak ada rekomendasi yang ditujukan untuk melindungi para pekerja tambang, padahal lokasi *Tailings Dump* #1 hanya berjarak beberapa ratus meter di atas berbagai infrastruktur pertambangan (lihat Gambar 37).

Tabel 3. Nilai FK Lereng pada setiap sayatan

Desain	Sayatan	FK Statis (FK min. ≥ 1.3)	Keterangan
Disposal Tailing Dam (Karo)	A-A'	3.203	Stabil
	B-B'	2.184	Stabil
	C-C'	1.045	Kritis
	D-D'	1.856	Stabil

Gambar 39. Menurut Harita Nickel dan PT TBP (2023), fasilitas penyimpanan tailing yang difilter bernama "*Disposal Tailing Dam* (Karo)" (lihat *Tailings Dump* #1 dalam Gambar 37) memiliki faktor keamanan statis sebesar 1,045, sehingga fasilitas tersebut berada di ambang kegagalan katastrofik ("kritis" dalam Bahasa Indonesia setara dengan "critical" dalam Bahasa Inggris). Harita Nickel dan PT TBP (2023) merekomendasikan agar tidak ada tambahan tailing yang dibuang ke *Tailings Dump* #1, namun tidak memberikan rekomendasi apa pun terkait keselamatan para pekerja tambang, padahal lokasi *Tailings Dump* #1 hanya berjarak beberapa ratus meter di atas berbagai infrastruktur pertambangan (lihat Gambar 37). Tabel dari Harita Nickel dan PT TBP (2023).

PULAU SULAWESI: KEGAGALAN KATASTROFIK YANG SEDANG BERLANGSUNG

Likuefaksi dan Tumpahan Tailing pada 16 Maret 2025

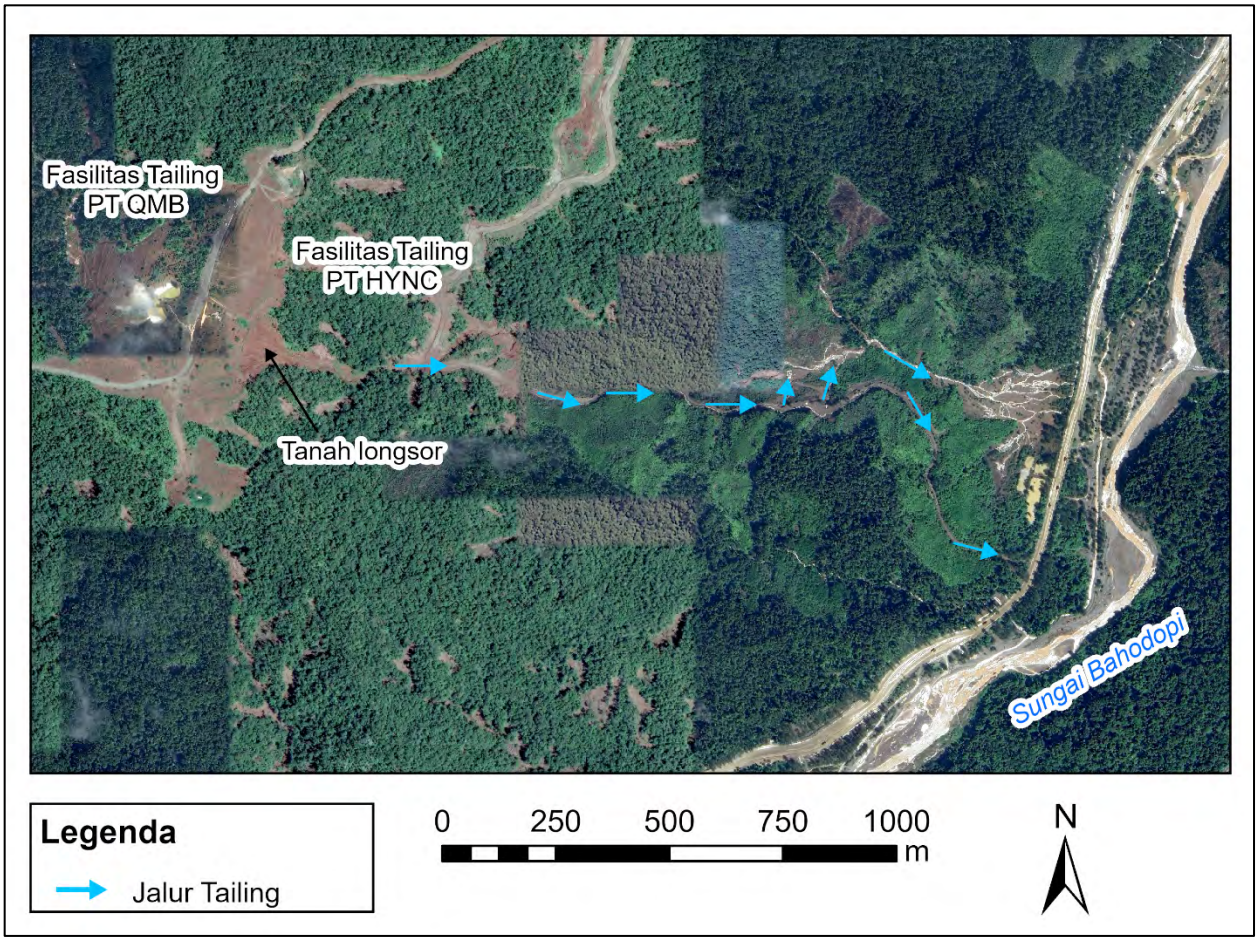
Bagian ini bertujuan untuk menguraikan kegagalan katastrofik yang sedang berlangsung pada fasilitas penyimpanan tailing yang difilter yang terhubung dengan Indonesia Morowali Industrial Park di Pulau Sulawesi (lihat Gambar 3, 23, dan 24). Kegagalan katastrofik ini telah berlangsung setidaknya sejak September 2023 dan meningkat baik dalam tingkat keparahan maupun frekuensinya pada Maret dan April 2025. Bagian sebelumnya mengenai kegagalan katastrofik yang mengancam di Pulau Obi sebagian besar didasarkan pada laporan konsultan serta dokumen internal dan publik dari perusahaan tambang. Sebaliknya, karena tidak tersedianya informasi semacam itu, bagian ini terutama bergantung pada laporan media serta informasi, foto, dan video dari para pekerja tambang yang namanya tidak dapat disebutkan.

Pada 16 Maret 2025, fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT Huayue Nickel Cobalt (HYNC) mengalami kegagalan akibat likuefaksi (lihat Gambar 40a), yang merupakan kasus pertama yang terdokumentasi dari likuefaksi pada tumpukan tailing yang difilter. Menurut Asnawi (2025), "Morowali yang memiliki curah hujan tinggi menjadikan dried tailing berubah menjadi lumpur dan membelah dinding tanggul." Dari fasilitas tailing PT HYNC, tailing yang tumpah mengalir sekitar dua kilometer ke arah timur hingga mencapai Sungai Bahodopi, dari sana tailing mengalir ke arah barat laut menuju Laut Banda dan melimpah ke area PT Fajar Metal Industry (FMI) (lihat Gambar 24, 40b–c, dan 41a) (Bhawano, 2025; Business & Human Rights Resource Centre, 2025a; Da Costa, 2025; Kabar Sulteng, 2025b; Media Alkhairaat, 2025a–b; Moore, 2025; Morrill, 2025; TribunPalun.com, 2025; Yayasan Tanah Merdeka (YTM), 2025a). Menurut TribunPalun.com (2025), "Persitiwa banjir tersebut diduga berhubungan dengan jebolnya tanggul di area Fasilitas Penyimpanan Tailing PT Huayue Nickel Cobalt." Citra Google Earth dari 3 Januari 2025 menunjukkan longsoran yang jelas berasal dari fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT HYNC dengan saluran aliran tailing yang juga terlihat jelas menuju ke Sungai Bahodopi (lihat Gambar 41a–b) (Media Alkhairaat, 2025a; Yayasan Tanah Merdeka (YTM), 2025b). Karena itu, kemungkinan besar fasilitas tailing PT HYNC sudah pernah mengalami keruntuhan setidaknya satu kali sebelum peristiwa pada 16 Maret 2025 terjadi.

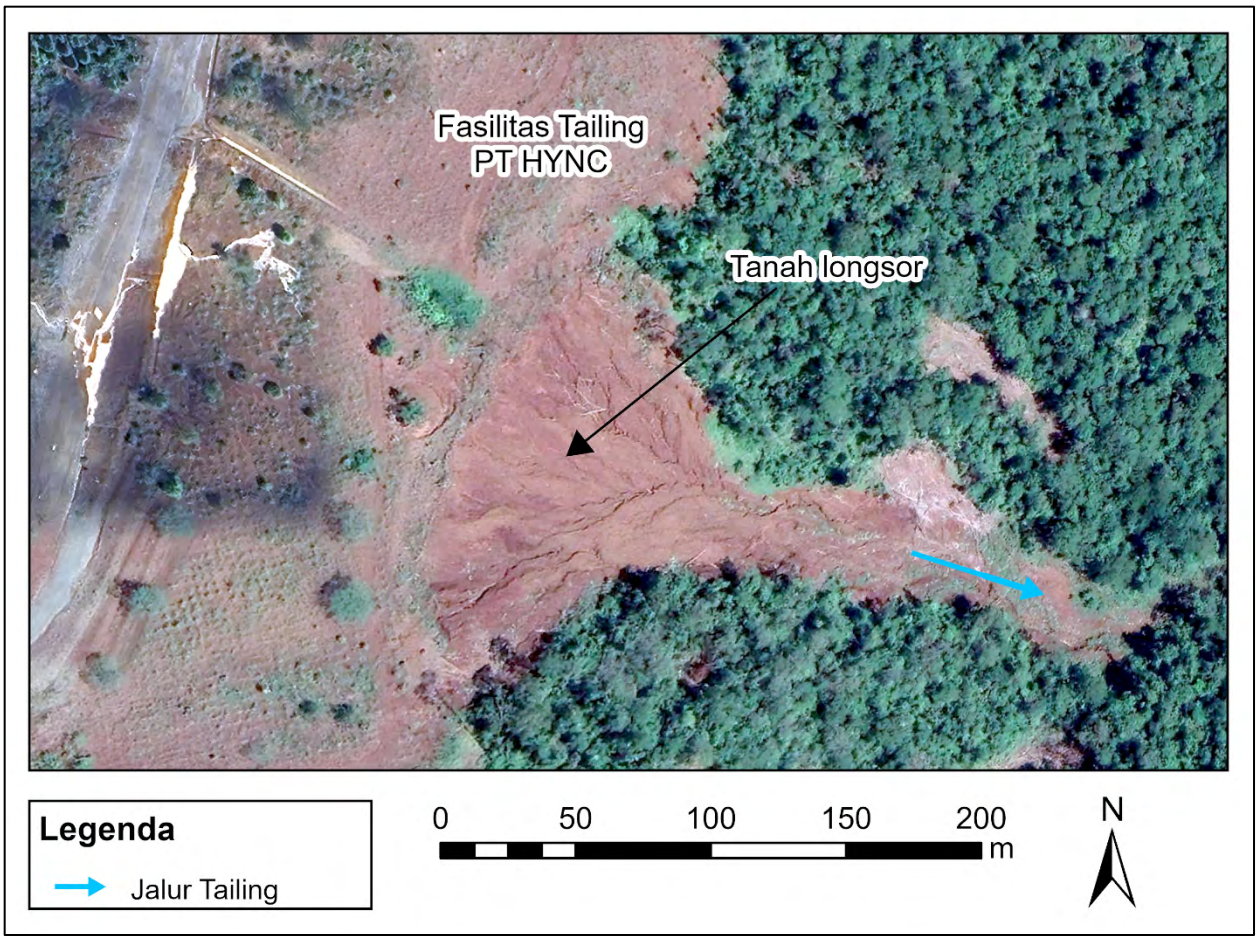
Gambar 40a. Tailing yang mengalami likuefaksi mengalir melalui celah pada fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT Huayue Nickel Cobalt (HYNC) di kawasan Indonesia Morowali Industrial Park (lihat Gambar 3, 24, dan 41a–b) pada 16 Maret 2025. Cuplikan gambar diambil dari detik ke-0 dalam video berdurasi 9 detik yang direkam oleh seorang pekerja tambang di PT HYNC. Foto ini juga tersedia di Business & Human Rights Resource Centre (2025a) dan Moore (2025).

Gambar 40b. Tailing yang tumpah akibat keruntuhan pada 16 Maret 2025 dari fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT Huayue Nickel Cobalt (HYNC) di kawasan Indonesia Morowali Industrial Park (lihat Gambar 3, 23, 24, dan 41a–b) mengalir ke hilir melalui Sungai Bahodopi. Foto oleh pekerja tambang di PT HYNC dan tersedia di Business & Human Rights Resource Centre (2025a) serta Moore (2025). Foto serupa juga tersedia dalam Bhawano (2025), Pristiandaru (2025), Teraskabar.id (2025), dan Wikaksono (2025).

Gambar 40c. Tailing yang mengalami likuefaksi dari keruntuhan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT HYNC, bersama dengan air banjir dari Sungai Bahodopi (lihat Gambar 40a–b), melimpah ke area PT Fajar Metal Industry (FMI) pada 16 Maret 2025 (lihat Gambar 23–24). Cuplikan gambar diambil dari detik ke-3 dalam video berdurasi 10 detik oleh seorang pekerja tambang.



Gambar 41a. Citra *Google Earth* dari 3 Januari 2025 menunjukkan longsoran yang jelas dari fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT Huayue Nickel Cobalt (HYNC), dengan saluran aliran tailing yang juga terlihat jelas menuju ke Sungai Bahodopi (lihat tampilan skala lebih kecil pada Gambar 41b). Karena itu, kemungkinan besar fasilitas tailing PT HYNC sudah pernah mengalami keruntuhan setidaknya satu kali sebelum peristiwa pada 16 Maret 2025 terjadi (lihat Gambar 40a–c). Belum sepenuhnya jelas apakah fasilitas penyimpanan tailing milik PT HYNC dan PT QMB merupakan dua fasilitas yang terpisah (lihat Gambar 40a dan 42a). Citra Google Earth yang lebih gelap berasal dari 7 Januari 2020. Versi peta berbahasa Indonesia tersedia dalam Bhawano (2025) dan Yayasan Tanah Merdeka (YTM) (2025b).



Gambar 41b. Citra *Google Earth* tanggal 3 Januari 2025 menunjukkan longsoran yang terlihat jelas dari fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT Huayue Nickel Cobalt (HYNC) (lihat tampilan skala lebih besar dengan kelanjutan jalur aliran tailing pada Gambar 41a). Karena itu, kemungkinan besar fasilitas tailing PT HYNC sudah pernah mengalami keruntuhan setidaknya satu kali sebelum peristiwa pada 16 Maret 2025 terjadi (lihat Gambar 40a-c). Peta ini juga tersedia dalam Business & Human Rights Resource Centre (2025a) dan Moore (2025).

Lokasi fasilitas tailing PT HYNC dikenal sebagai IMIP8 atau KM8 (lihat Gambar 24 dan 41a), dengan fasilitas PT HYNC terletak di sisi tenggara jalan raya, dan fasilitas tailing milik PT Qing Mei Bang (QMB) New Energy Materials berada di sisi barat laut jalan raya. Berdasarkan perbandingan foto dan citra satelit, Petley (2025a) mengusulkan bahwa peristiwa longsor sebenarnya terjadi sekitar 4 kilometer ke arah tenggara dari Sungai Bahodopi, di lokasi yang sebenarnya tidak terdapat fasilitas penyimpanan tailing. Namun, lokasi IMIP8 sebagai lokasi keruntuhan telah dikonfirmasi baik oleh para pekerja tambang maupun oleh PT IMIP (perusahaan pengelola Indonesia Morowali Industrial Park). Menurut CNN Indonesia (2025), "'Benar. Banjir ini terjadi di kawasan IMIP khususnya di area IMIP 8,' kata Head of Media Relations Department PT IMIP, Dedy Kurniawan dalam keterangan tertulisnya, Rabu (19/3)." Lokasi keruntuhan pada 16 Maret, maupun keruntuhan pada 21 Maret, akan dibahas lebih lanjut dalam subbagian berikutnya.

Laporan media terbaru menyoroti ancaman yang terus berlanjut terhadap Sungai Bahodopi, terutama mengingat adanya indikasi sejarah longsor dari fasilitas tailing PT HYNC (lihat Gambar 41a-b). Menurut Bhawano (2025), "Banjir dan longsor yang melanda kawasan PT

Indonesia Morowali Industrial Park (IMIP) pada Maret 2025 lalu menunjukkan rentannya pencemaran limbah tailing. Analisis Yayasan Tanam Merdeka menyebutkan sebanyak 11,5 juta ton limbah tailing di kawasan PT IMIP mengancam Sungai Bahodopi." Angka 11,5 juta ton limbah tailing tampaknya berasal dari asumsi bahwa produksi tailing tahunan di kawasan Indonesia Morowali Industrial Park mencapai 11,5 juta ton. Menurut Da Costa (2025), "Saat ini, IMIP menghasilkan 11,5 juta ton tailing setiap tahunnya." Menurut Yayasan Tanah Merdeka (YTM) (2025b), "Saat ini, setiap tahun total tailing yang dihasilkan PT Huayue Nickel Cobalt dan PT QMB New Energy Materials mencapai 11,5 juta ton."

Karena PT HYNC dan PT QMB mulai beroperasi masing-masing pada tahun 2021 dan 2022 (lihat Tabel 1a), maka volume produksi tailing tahunan tidak serta merta mencerminkan jumlah tailing yang berpotensi mengalir ke Sungai Bahodopi. Bagaimanapun juga, perkiraan terbaik dalam laporan ini menyatakan bahwa tingkat produksi tailing tahunan PT HYNC dan PT QMB masing-masing adalah 9,3 juta ton metrik dan 6,6 juta ton metrik (lihat Tabel 4). Kemungkinan besar, saat ini kedua perusahaan tersebut beroperasi pada kapasitas penuh (nameplate capacity), karena PT HYNC telah mencapai kapasitas penuh pada Juli 2023 (Fisher dan Grossl, 2023), dan seperti telah disebutkan sebelumnya, pencapaian kapasitas penuh dalam waktu 12–18 bulan telah menjadi praktik standar untuk proyek HPAL di Indonesia. Dengan demikian, tingkat produksi tailing saat ini dari PT HYNC dan PT QMB kemungkinan mencapai 15,9 juta ton metrik per tahun. Oleh karena itu, sangat mungkin bahwa keruntuhan total dari fasilitas tailing PT HYNC dan PT QMB dapat menyebabkan pelepasan tailing jauh melebihi 11,5 juta ton metrik ke Sungai Bahodopi, terutama karena kedua proyek HPAL tersebut kemungkinan telah beroperasi pada kapasitas penuh selama dua tahun terakhir. Faktor ketidakpastian terbesar dalam perhitungan ini adalah seberapa besar proporsi tailing yang disimpan di IMIP8 dibandingkan dengan lokasi lain yang belum teridentifikasi.

Longsor Tailing dan Korban Jiwa Pekerja pada 21 Maret 2025

Tragedi kembali terjadi lima hari kemudian, pada 21 Maret 2025, ketika longsor di fasilitas tailing PT QMB mengubur empat pekerja tambang (lihat Gambar 42a-b). Beberapa laporan menyebutkan tanggal 22 Maret, dengan penjelasan bahwa longsor terjadi sesaat setelah tengah malam waktu setempat. Satu pekerja berhasil ditemukan dalam keadaan selamat, sementara dua jenazah berhasil dievakuasi. Satu jenazah terakhir tidak pernah ditemukan, sehingga jumlah korban jiwa resmi tercatat sebanyak tiga orang. Keempat pekerja tersebut merupakan karyawan PT Morowali Investasi Konstruksi Indonesia (MIKI), kontraktor dari PT QMB. Keruntuhan fatal fasilitas tailing PT QMB ini banyak diberitakan di media berbahasa Indonesia, Tiongkok, dan Inggris (Asnawi, 2025; Bhawano, 2025; Business & Human Rights Resource Centre, 2025a; Da Costa, 2025; Hamdam, 2025; Harian Sulteng, 2025; Jakarta Post, 2025; Kabar Sulteng, 2025a-b; Man in Indonesia, 2025; Media Alkhairaat, 2025a; Moore, 2025; Morrill, 2025; Prihatini dan Jatmiko, 2025; TribunPalun.com, 2025; Yayasan Tanah Merdeka (YTM), 2025a-b).

Gambar 42a. Keruntuhan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT Qing Mei Bang (QMB) New Energy Materials di kawasan Indonesia Morowali Industrial Park (lihat Gambar 3, 23, 24, dan 41a) pada 21 Maret 2025 mengakibatkan empat pekerja terkubur, dengan tiga korban meninggal dunia dan satu orang selamat. Keempat pekerja tersebut adalah karyawan PT Morowali Investasi Konstruksi Indonesia (MIKI), kontraktor dari PT QMB New Energy Materials. Karena kemiripannya dengan Gambar 40a, belum jelas apakah fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT HYNC dan PT QMB merupakan dua fasilitas yang terpisah. Cuplikan gambar pada detik ke-0:12 dari video yang dibagikan oleh seorang pekerja tambang.

Gambar 42b. Pada 22 Maret 2025, alat berat digunakan untuk mencari empat pekerja yang tertimbun akibat keruntuhan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT Qing Mei Bang (QMB) New Energy Materials pada hari sebelumnya di kawasan Indonesia Morowali Industrial Park (lihat Gambar 3, 23, 24, dan 41a). Keempat pekerja tersebut adalah karyawan PT Morowali Investasi Konstruksi Indonesia (MIKI), kontraktor dari PT QMB New Energy Materials. Foto dari 曼谈印尼 [Man in Indonesia] (2025).

Foto-foto yang dimuat di media lokal alat berat pada 22 Maret untuk mencari empat pekerja yang tertimbun menunjukkan adanya kolam, meskipun citra satelit fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT HYNC/PT QMB tidak memperlihatkan adanya kolam (lihat Gambar 24 dan 41a). Menurut keterangan para pekerja tambang, sebelumnya terdapat kolam yang telah diurug untuk membangun fasilitas penyimpanan tailing yang difilter. Saat alat berat menggali hingga di bawah muka air tanah, kolam tersebut terbentuk kembali di lokasi aslinya. Salah satu korban ditemukan di dasar kolam tersebut. Mendirikan fasilitas penyimpanan tailing di atas kolam yang telah diurug merupakan praktik yang patut dipertanyakan karena dapat menyebabkan tingginya muka air tanah di dalam fasilitas tersebut. Sebagai contoh, menurut *SME Tailings Management Handbook*, "Do not site [filtered tailings storage facilities] where 'blinding off' groundwater discharge areas" (Davies et al., 2022). Dengan demikian, fasilitas penyimpanan tailing yang difilter tampaknya runtuh di titik terlemahnya, yaitu di lokasi dengan muka air tanah yang paling tinggi.

Lokasi keruntuhan fasilitas tailing PT QMB tampak sangat mirip dengan lokasi jebolnya fasilitas tailing PT HYNC (bandingkan Gambar 40a dengan Gambar 42a), sehingga menimbulkan pertanyaan apakah kedua fasilitas penyimpanan tailing tersebut memang terpisah. Di sisi lain, baik PT HYNC maupun PT IMIP menyatakan bahwa keruntuhan pada 16 Maret dan longsor pada 21 Maret terjadi di lokasi yang berbeda, dengan PT HYNC secara tegas menyatakan bahwa fasilitas tailing mereka terpisah dari milik PT QMB. Dalam pernyataan dari Zhejiang Huayou Cobalt, pemilik mayoritas PT HYNC, disebutkan: "Telah dipastikan bahwa insiden tailing yang terjadi di dalam kawasan IMIP pada 21 Maret 2025 tidak terkait dengan proyek Huayue, melainkan dengan perusahaan HPAL lain yang beroperasi di kawasan industri tersebut. Fasilitas penyimpanan tailing Huayue dikelola secara independen dan beroperasi terpisah dari entitas lain" (Business & Human Rights Resource Centre, 2025b). Menurut Prihatini dan Jatmiko (2025), "Dihubungi secara terpisah, Head of Media Relations Department PT IMIP, Dedy Kurniawan, membantah bahwa longsor terjadi akibat amblesnya tanggul penyimpanan tailing. 'Itu keliru, longsor terjadi bukan karena jebol kolam limbah. Seminggu sebelum longsor memang sempat terjadi banjir, namun lokasinya berbeda dengan lokasi longsor ini,' jelas Dedy."

Berdasarkan perbandingan antara foto media dan citra satelit, Petley (2025b) menyimpulkan bahwa keruntuhan pada 16 Maret dan longsor pada 21 Maret terjadi di lokasi yang sama, bukan di IMIP8, melainkan di suatu lokasi sekitar 4 kilometer tenggara Sungai Bahodopi yang bukan merupakan fasilitas penyimpanan tailing. Sebaliknya, informasi dari para pekerja tambang menyebutkan bahwa keruntuhan pada 16 Maret terjadi di fasilitas tailing PT HYNC, dan longsor pada 21 Maret terjadi di fasilitas milik PT QMB, dengan kedua fasilitas tailing tersebut berada di IMIP8, meskipun di sisi jalan yang berlawanan (lihat Gambar 24 dan 41a). Menurut Kabar Sulteng (2025b), "Yayasan Tanah Merdeka (YTM) mengungkapkan bahwa longsor terjadi di area fasilitas penyimpanan tailing (Tailings Storage Facility/TSF) di kilometer 8 PT IMIP, Kabupaten Morowali." Menurut Yayasan Tanah Merdeka (YTM) (2025a), "Berdasarkan hasil pengumpulan informasi hingga saat ini, Yayasan Tanah Merdeka menganggap bahwa kecelakaan kerja terjadi di area Fasilitas Penyimpanan Tailing PT QMB New Energy Materials di kilometer 8."

Runtuhnya Timbunan Bijih pada 27 Maret 2025

Pada 27 Maret 2025, sebuah timbunan bijih (*ore stockpile*) runtuh di proyek PT Qing Mei Bang (QMB) New Energy Materials, menyebabkan alat berat tertimbun, meskipun tidak ada korban jiwa (Business & Human Rights Resource Centre, 2025a; Moore, 2025; Petley, 2025b; lihat Gambar 43). Insiden ini tidak dilaporkan di media Indonesia dan hanya diketahui melalui foto dan video dari para pekerja tambang (Destination954, 2025; Pakiding, 2025a-b). Lokasi timbunan bijih PT QMB tidak diketahui secara pasti. Meskipun timbunan bijih bukanlah fasilitas penyimpanan tailing, keruntuhan berulang dari material tambang ini menimbulkan pertanyaan serius mengenai kualitas rekayasa geoteknik di kawasan Indonesia Morowali Industrial Park.

Gambar 43. Pada 27 Maret 2025, sebuah timbunan bijih runtuh di proyek PT Qing Mei Bang (QMB) New Energy Materials di kawasan Indonesia Morowali Industrial Park (lihat Gambar 3 dan 23), yang mengakibatkan alat berat tertimbun. Lokasi timbunan bijih tersebut tidak diketahui secara pasti. Cuplikan gambar pada detik ke-0:13 dari video yang dibagikan oleh seorang pekerja tambang.

Longsor Tailing pada 30 April 2025 dan Longsor Sebelumnya

Longsor terbaru di fasilitas tailing PT QMB terjadi pada 30 April 2025 (lihat Gambar 44). Peristiwa ini hanya diketahui melalui foto dan video yang disebarkan oleh para pekerja tambang, dan belum dilaporkan oleh media mana pun. Sebelumnya, sebuah video yang diunggah oleh salah satu pekerja menunjukkan sebuah buldoser sepenuhnya tertimbun oleh longsor di sebuah fasilitas penyimpanan tailing yang difilter yang tidak diidentifikasi, pada September 2023 (Petley, 2025b; lihat Gambar 45). Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya, citra satelit menunjukkan setidaknya satu peristiwa longsor besar dari fasilitas tailing PT HYNC sebelum 3 Januari 2025 (lihat Gambar 41a-b).

Serikat pekerja tambang menyatakan bahwa peristiwa longsor sering terjadi di kawasan Indonesia Morowali Industrial Park, namun tidak terdokumentasi, bahkan ketika menimbulkan korban jiwa. Menurut Kabar Sulteng (2025a), "Serikat Buruh Industri Pertambangan dan Energi (SBIPE) menyebut kecelakaan kerja sudah berulang kali terjadi di kompleks PT IMIP. 'Kasus kecelakaan kerja ini terus berulang. Tidak hanya di lokasi yang saat ini terjadi longsor, tetapi di semua bagian pekerjaan di PT IMIP,' kata Ketua SBIPE IMIP Morowali, Henry saat dihubungi, Minggu (23/03/2025)." Henry mengatakan bahwa pihaknya masih terus menghimpun data di lapangan terkait jumlah korban jiwa akibat longsor. Belum jelas apakah rangkaian longsor yang terus terjadi tersebut berlangsung di fasilitas penyimpanan tailing atau pada infrastruktur pertambangan lainnya seperti timbunan bijih.

Gambar 44. Pada 30 April 2025, terjadi longsor di fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik proyek PT Qing Mei Bang (QMB) New Energy Materials di kawasan Indonesia Morowali Industrial Park (lihat Gambar 3, 23, dan 24). Cuplikan gambar pada detik ke-0:12 dari video berdurasi 30 detik yang direkam oleh pekerja tambang.

Gambar 45. Sebuah buldoser tertimbun oleh longsor di fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di kawasan Indonesia Morowali Industrial Park (lihat Gambar 3 dan 23) pada September 2023. Cuplikan gambar pada detik ke-0:03 dari Kuli Tambang Random [Random Mineworker] (2023).

Tanggapan Pemerintah dan Perusahaan terhadap Keruntuhan Katastropik

Hingga saat ini, belum ada tanggapan dari pemerintah Indonesia terhadap peristiwa keruntuhan katastropik fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di kawasan Indonesia Morowali Industrial Park. Justru sebaliknya, pada 4 Mei 2025, PT IMIP, PT HYNC, dan PT QMB semuanya menerima penghargaan lingkungan hidup dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia yang disebut Penghargaan Proper Biru (Media Alkhairaat, 2025b). Menurut Media Alkhairaat (2025b), "Di akun official Instagram IMIP mereka mengakui penghargaan tersebut sebagai prestasi perusahaan baik dalam pengelolaan lingkungan hidup [Governance Sustainability Company]." Organisasi Yayasan Tanah Merdeka menyatakan

kemarahannya atas pemberian penghargaan tersebut, yang dinilai tidak tepat. Menurut Media Alkhairaat (2025b), "Direktur Eksekutif Yayasan Tanah Merdeka Richard F Labiro, mengatakan, Proper Biru KLHK kepada PT IMIP bertentangan dengan fakta sebenarnya. 'Bagi kami, penghargaan Proper itu telah membutakan mata publik atas serangkaian pelanggaran lingkungan hakiki PT IMIP …,' kata Richard … Lebih lanjut kata Richard, Maret 2025, dua bencana terjadi. Pada 16 Maret, banjir dan longsor menimpa Desa Labota dan kawasan PT IMIP, berdampak pada 341 KK (1.092 jiwa). Pada 22 Maret, longsor di fasilitas tailing PT QMB menewaskan tiga pekerja."

Tanggapan pertama dari PT IMIP, perusahaan yang mengelola kawasan Indonesia Morowali Industrial Park, adalah menyatakan bahwa tidak ada masalah. Menurut Reuters (2025), "Operasi berjalan normal di kompleks pengolahan nikel terbesar di Indonesia, kawasan industri Morowali di pulau timur Sulawesi, meskipun terjadi banjir minggu ini, kata juru bicara perusahaan pada Rabu [19 Maret 2025] … Dedy Kurniawan, juru bicara perusahaan pengelola kawasan tersebut, mengatakan bahwa hujan deras selama empat jam pada hari Senin menyebabkan banjir di area pembangunan pabrik baru. 'Banjir tidak menghentikan operasi pabrik,' katanya, seraya menambahkan bahwa pekerjaan konstruksi di pabrik baru juga telah kembali normal." Pernyataan ini disampaikan setelah peristiwa 16 Maret, di mana fasilitas tailing PT HYNC mengalami pelikuifaksian dan mencemari Sungai Bahodopi (lihat Gambar 40a-c), namun sebelum peristiwa 21 Maret yang menyebabkan tiga pekerja tambang meninggal dunia akibat longsor di fasilitas tailing PT QMB (lihat Gambar 42a-c). Tidak ada tanggapan yang pernah diberikan oleh PT HYNC maupun perusahaan induknya atas peristiwa 16 Maret tersebut.

Tanggapan kedua dari PT IMIP adalah menyalahkan curah hujan atas kematian tiga pekerja tambang. Menurut Da Costa (2025), "Dedy Kurniawan, juru bicara PT IMIP, membantah tuduhan bahwa longsor 22 Maret disebabkan oleh kegagalan bendungan tailing. 'Longsor yang terjadi pada 22 Maret sekitar tengah malam merupakan akibat dari hujan deras selama lebih dari empat jam berturut-turut di bagian selatan kawasan IMIP. Dalam beberapa hari sebelum kejadian, Kecamatan Bahodopi dan kompleks IMIP mengalami hujan lebat hampir setiap hari. Tidak benar dan menyesatkan untuk mengaitkan longsor tersebut dengan kegagalan bendungan …'" Menurut Hamdam (2025), "'Intensitas hujan yang cukup tinggi menyebabkan longsor di dalam kawasan PT IMIP,' ujar Head of Media Relations Department PT IMIP Dedy Kurniawan dalam keterangannya, Sabtu (22/3/2025)." Pernyataan serupa dari PT IMIP juga muncul di media berbahasa Tiongkok (Man in Indonesia, 2025).

Tanggapan PT IMIP terhadap kecelakaan 21 Maret dapat dirangkum sebagai berikut:

1) Longsor di fasilitas tailing PT QMB yang menewaskan tiga pekerja tidak dianggap sebagai "kegagalan bendungan".
2) Longsor disebabkan oleh curah hujan yang tinggi.

Bagian pertama dari tanggapan ini cukup membingungkan. Tidak jelas mengapa PT IMIP tidak menganggap longsor tersebut sebagai kegagalan fasilitas penyimpanan tailing. Kemungkinan PT IMIP menyiratkan bahwa longsor itu tidak dianggap sebagai kegagalan karena tidak ada tailing atau air yang tumpah dari lokasi fasilitas penyimpanan tailing yang difilter, namun hal ini tidak dinyatakan secara eksplisit oleh PT IMIP. Selain itu, tampaknya juga belum diketahui secara pasti apakah ada tailing yang keluar dari lokasi fasilitas ke lingkungan akibat peristiwa 21 Maret. Bagaimanapun juga, seperti telah disampaikan dalam bagian "Ikhtisar", sudah sepatutnya bahwa setiap insiden di fasilitas penyimpanan tailing yang mengakibatkan

korban jiwa harus dianggap sebagai "kegagalan katastropik", terlepas dari apakah tailing atau air dilepaskan atau tidak.

Bagian kedua dari tanggapan tersebut jelas keliru. Curah hujan tinggi dapat menyebabkan longsor pada lahan alami, tetapi tidak dapat dianggap sebagai penyebab kegagalan fasilitas penyimpanan tailing. Curah hujan tinggi tidak dapat dikategorikan sebagai penyebab utama, penyebab langsung, maupun bagian dari rantai penyebab. Di Indonesia, curah hujan tinggi merupakan bagian dari kondisi alam yang wajar. Fasilitas penyimpanan tailing di Indonesia seharusnya dirancang untuk dapat menahan curah hujan tinggi. Oleh karena itu, penyebab sebenarnya kemungkinan besar berkaitan dengan kesalahan desain, kesalahan konstruksi, atau kesalahan operasional—bukan semata-mata curah hujan.

Tanggapan dari PT QMB atas peristiwa 21 Maret melanjutkan narasi tentang curah hujan tinggi, dengan tambahan bahwa curah hujan tersebut merupakan peristiwa ekstrem yang disebut "di luar kendali manusia." Menurut pernyataan dari PT QMB, "Pada pukul 00.10 WITA tanggal 22 Maret 2025, hujan deras yang terus-menerus memicu banjir bandang dan longsor, mengakibatkan tiga pekerja tambang nikel yang dipekerjakan oleh kontraktor PT Morowali Investasi Konstruksi Indonesia (MIKI) tertimbun material. Ini adalah bencana alam luar biasa, diklasifikasikan sebagai peristiwa hujan 50 tahunan, di mana banjir dan longsor yang terjadi berada di luar kendali manusia" (Business & Human Rights Resource Centre, 2025c).

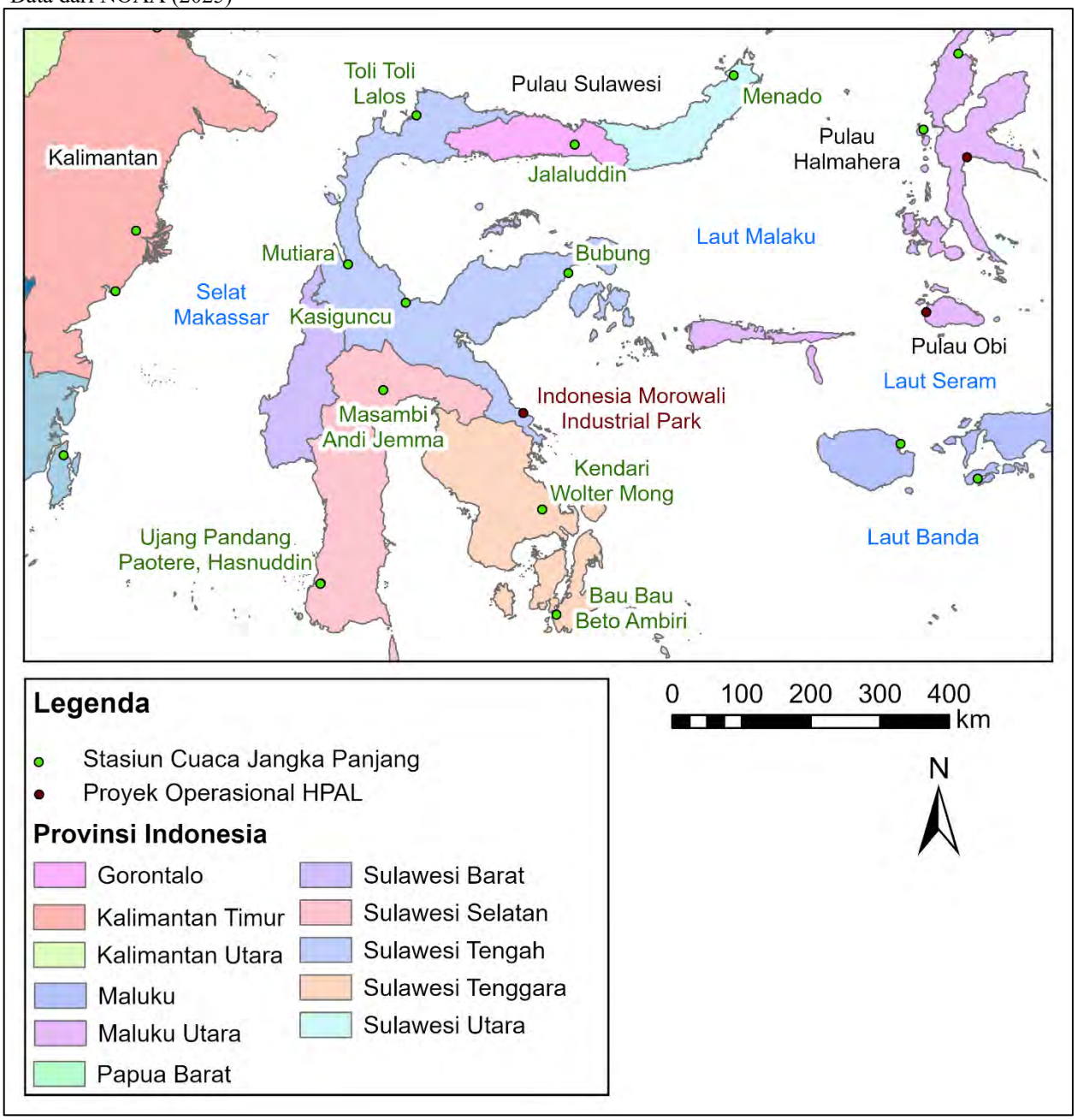
Pertama-tama, tidak jelas bagaimana manajemen PT QMB dapat mengetahui bahwa intensitas hujan tersebut merupakan peristiwa dengan periode ulang 50 tahun (yang setara dengan probabilitas kejadian tahunan sebesar 2%). Terdapat 11 stasiun cuaca jangka panjang di Pulau Sulawesi, dan stasiun terdekat dari fasilitas penyimpanan tailing yang difilter PT HYNC/PT QMB di kawasan Indonesia Morowali Industrial Park adalah Kendari Wolter Mong, yang berjarak 143 kilometer (lihat Tabel 7 dan Gambar 46). Umumnya, estimasi terhadap besarnya peristiwa hujan ekstrem membutuhkan data curah hujan di lokasi selama setidaknya 30 tahun. Kedua, dalam konteks fasilitas penyimpanan tailing, peristiwa hujan dengan periode ulang 50 tahun tidak dapat disebut ekstrem atau "luar biasa." Desain untuk menghadapi peristiwa hujan 50 tahunan adalah kriteria yang biasa digunakan untuk saluran pembuangan air hujan di area parkir pusat perbelanjaan (Nathanson, 2007), yaitu sistem rekayasa dengan konsekuensi kegagalan yang sangat rendah.

Tabel 7. Stasiun cuaca jangka panjang di Pulau Sulawesi beserta jaraknya ke fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT HYNC/PT QMB[1]

Nama Stasiun	Lintang (°N)	Bujur (°E)	Jarak (km)	Tanggal Mulai	Cakupan (%)
Bau Bau Beto Ambiri	-5.467	122.617	296	20/5/1980	67
Bubung	-1.030	122.770	215	19/9/1978	78
Hasanuddin	-5.062	119.554	373	1/4/1958	72
Jalaluddin	0.637	122.850	395	1/3/1959	76
Kasiguncu	-1.417	120.658	224	26/8/1978	53
Kendari Wolter Mong	-4.100	122.433	143	20/3/1959	44
Masamba Andi Jemma	-2.550	120.367	194	6/5/1989	87
Menado Sam Ratulan	1.533	124.917	580	1/11/1961	80
Mutiara	-0.919	119.910	323	1/12/1959	68
Toli Toli Lalos	1.017	120.800	453	10/5/1982	69

Ujang Pandang Paotere	-5.067	119.550	373	23/10/1986	73

[1]Data dari NOAA (2025)



Gambar 46. Terdapat 11 stasiun cuaca jangka panjang di Pulau Sulawesi, dan yang terdekat dengan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter milik PT HYNC/PT QMB di kawasan Indonesia Morowali Industrial Park (lihat Gambar 23–24) adalah Kendari Wolter Mong, yang berjarak 143 kilometer (lihat Tabel 7). Meskipun PT QMB menyalahkan longsor pada 21 Maret 2025 yang menewaskan tiga orang (lihat Gambar 42a-c) pada peristiwa curah hujan yang disebut "di luar kendali manusia," perkiraan curah hujan untuk peristiwa 50 tahunan di lokasi kecelakaan fatal tersebut sangat mungkin tidak diketahui dengan pasti. Sumber data stasiun cuaca dari NOAA (2025).

Standar Industri Global untuk Pengelolaan Tailing (GISTM) menetapkan sistem klasifikasi konsekuensi lima tingkat (Rendah, Signifikan, Tinggi, Sangat Tinggi, dan Ekstrem),

dengan masing-masing klasifikasi dikaitkan dengan parameter desain curah hujan tertentu. Klasifikasi konsekuensi Tinggi, Sangat Tinggi, dan Ekstrem masing-masing melibatkan potensi kehilangan jiwa sebanyak 1–10 orang, 10–100 orang, dan lebih dari 100 orang (ICMM–UNEP–PRI, 2020). Kriteria desain curah hujan yang sesuai memiliki periode ulang 2.475 tahun, 5.000 tahun, dan 10.000 tahun untuk klasifikasi konsekuensi Tinggi, Sangat Tinggi, dan Ekstrem secara berurutan. Terlepas dari konsekuensi kegagalan selama operasi, semua fasilitas penyimpanan tailing harus dirancang untuk mampu menahan peristiwa curah hujan dengan periode ulang 10.000 tahun setelah penutupan (ICMM–UNEP–PRI, 2020). Paling tidak, fasilitas tailing milik PT QMB memiliki konsekuensi kegagalan Tinggi, karena telah menimbulkan tiga korban jiwa. Oleh karena itu, menurut GISTM, fasilitas tailing PT QMB seharusnya dirancang untuk menahan peristiwa curah hujan dengan periode ulang 2.475 tahun. Meskipun PT QMB maupun perusahaan induknya bukan anggota ICMM, telah disebutkan sebelumnya bahwa GISTM telah banyak diadopsi di Australia, Asia Timur, serta di industri pertambangan nikel dan kobalt.

Dokumen panduan *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management* tidak menggunakan jumlah korban jiwa sebagai dasar penetapan kriteria desain, dan menyatakan bahwa "Setiap potensi kehilangan jiwa adalah peristiwa ekstrem dan desain harus merespons sesuai dengan itu" (Morrill et al., 2022). Menurut *Safety First*, "Jika suatu perusahaan, lembaga pengatur, atau pihak ketiga independen mengidentifikasi potensi kehilangan jiwa akibat kegagalan bendungan tailing, maka bendungan tersebut harus dirancang untuk mampu menahan *Probable Maximum Flood (PMF)*, yaitu banjir terbesar yang secara teoritis mungkin terjadi di suatu lokasi…" (Morrill et al., 2022). Perlu dicatat bahwa menurut U.S. Army Corps of Engineers, "PMF tidak memiliki probabilitas kejadian yang spesifik, tetapi umumnya dianggap jauh melampaui periode ulang 10.000 tahun" (USACE–HEC, 2003). Pedoman keselamatan bendungan tailing dari FEMA Amerika Serikat sejalan dengan standar keselamatan ketat dari *Safety First*. Menurut FEMA (2025), konsekuensi Tinggi berarti adanya potensi kehilangan jiwa "lebih dari nol." Untuk fasilitas penyimpanan tailing dengan konsekuensi kegagalan Tinggi, FEMA (2025) mewajibkan desain untuk menahan peristiwa curah hujan dengan periode ulang 10.000 tahun atau PMF. Singkatnya, ketidakmampuan fasilitas tailing PT QMB untuk bertahan terhadap peristiwa 50 tahunan sangat bertentangan dengan standar internasional mana pun, yang pada batas minimum mensyaratkan desain untuk menahan peristiwa 2.475 tahunan, dan untuk standar yang lebih ketat, mensyaratkan ketahanan terhadap PMF atau peristiwa 10.000 tahunan.

SKENARIO BERBAHAYA YANG TERBENTANG DI DEPAN

Jika praktik bisnis yang dijalankan selama ini terus dilanjutkan, maka jumlah fasilitas penyimpanan tailing yang difilter akan terus bertambah disertai dengan meningkatnya frekuensi dan tingkat keparahan keruntuhan yang bersifat katastrofik. Terdapat tiga skenario alternatif atas kelanjutan praktik bisnis yang dijalankan selama ini, yang masing-masing lebih berbahaya dari yang sebelumnya. Skenario alternatif pertama, yang sebenarnya sudah mulai diterapkan sejak Desember 2022, adalah pengabaian teknologi tailing yang difilter dan menggantinya dengan pembangunan bendungan tailing konvensional untuk fasilitas-fasilitas baru. Terkait proyek PT HPL di Pulau Obi, SRK Consulting (2022a) menulis, "Setelah kapasitas fasilitas penyimpanan tailing kering (dry stack) tercapai, direncanakan bahwa tailing selanjutnya akan dikelola dengan cara deposisi lumpur ke dalam tiga bendungan tempat penyimpanan residu (residue storage facility/RSF), yang memiliki total kapasitas penyimpanan 410 juta meter kubik dan

diproyeksikan cukup untuk 28 tahun ke depan." Kapasitas tersebut diperkirakan akan tercapai pada pertengahan 2027 menurut SRK Consulting (2022a), atau sebelum akhir tahun 2029 menurut perusahaan tambang (PT Halmahera Persada Lygend, 2024). Faktanya, perusahaan tambang tersebut telah mengajukan izin untuk pembangunan bendungan tailing konvensional. Menurut SRK Consulting (2022a), "Menurut pendapat SRK, desain ini [untuk bendungan tailing konvensional] masih berada pada tahap konseptual … Perlu dicatat bahwa rencana desain tersebut telah diajukan untuk mendapatkan persetujuan dari pemerintah Indonesia dan saat ini sedang dalam proses peninjauan." Tidak jelas bagaimana rencana yang masih pada tahap konseptual dapat diajukan untuk mendapat persetujuan pemerintah, dan juga tidak jelas apakah persetujuan pemerintah pada tahap ini sudah merupakan izin final untuk pembangunan bendungan tailing.

Menurut SRK Consulting (2022a), RSF #1, RSF #2, dan RSF #3 direncanakan untuk dioperasikan secara berurutan pada tiga periode berbeda, yaitu Tahun ke-1 sampai ke-4 untuk RSF #1, Tahun ke-5 sampai ke-17 untuk RSF #2, dan Tahun ke-18 sampai ke-28 untuk RSF #3. Volume penyimpanan tailing dari RSF #1, RSF #2, dan RSF #3 masing-masing adalah 58,5 juta m^3, 196 juta m^3, dan 157 juta m^3, dengan total 411,5 juta m^3 (sedikit lebih besar dari yang dinyatakan dalam kutipan sebelumnya). Ketinggian bendungan tailing masing-masing adalah 106 meter, 75 meter, dan 66 meter. Kontur fasilitas tailing konvensional sebagaimana ditampilkan dalam SRK Consulting (2022a) agak sulit dilihat karena peletakan label (lihat Gambar 47). Gambar 38 dalam laporan ini menunjukkan upaya terbaik dalam menelusuri kontur untuk menunjukkan lokasi fasilitas tersebut relatif terhadap infrastruktur tambang lainnya dan sistem sungai di Pulau Obi. Pengukuran pada Gambar 38 menghasilkan total jejak lahan dari tiga fasilitas tailing konvensional seluas 1.556 hektare, yaitu delapan kali lipat dari jejak lahan maksimum fasilitas tailing kering (Dry Stack Tailings Facility/DSTF) proyek PT HPL yang hanya 195 hektare. Dengan demikian, bendungan tailing konvensional yang direncanakan akan menyebabkan kerusakan hutan jauh lebih besar daripada pembangunan DSTF. Kehadiran RSF #2 dan RSF #3 di hulu Sungai Akelamo juga menimbulkan kekhawatiran bahwa kegagalan bendungan tailing dapat mencemari seluruh Daerah Aliran Sungai (DAS) Akelamo (lihat Gambar 38).

Alasan mengapa fasilitas penyimpanan tailing yang difilter lebih unggul daripada bendungan tailing konvensional telah dibahas sebelumnya dalam bagian "Ikhtisar" dan "Tutorial" dan tidak perlu diulang di sini. Selain itu, riwayat pengelolaan bendungan tailing konvensional di Indonesia tidak sepenuhnya positif, terutama terkait penutupan tambang. Dalam survei mereka terhadap bendungan tailing di Asia, Baker et al. (2025) berhasil mengidentifikasi enam puluh tambang di Indonesia yang memiliki setidaknya satu bendungan tailing. Mereka juga mengidentifikasi 155 tambang lain dengan informasi mengenai metode pembuangan atau penyimpanan tailing. Menurut Baker et al. (2025), "Namun, terdapat riwayat ketidakpatuhan terhadap kewajiban pascatambang (Narendra et al. 2021). Lebih dari 60% perusahaan yang memiliki Izin Usaha Pertambangan (IUP) pada tahun 2018 belum menyetorkan dana jaminan reklamasi atau pascatambang yang diwajibkan. Meskipun hal ini merupakan persyaratan hukum dari lisensi tambang, ketidakpatuhan umumnya tidak berdampak signifikan terhadap perusahaan tambang (Sinaga et al. 2020)."

Sebuah laporan dari LSM Bersihkan Indonesia (2020) mengevaluasi kerentanan terhadap korupsi dalam kebijakan dana jaminan pascatambang, dan menghasilkan empat temuan utama:

- Mekanisme perizinan tidak mengaudit kepatuhan terhadap setoran dana jaminan reklamasi dan pascatambang.
- Perusahaan tambang tidak menganggap kewajiban reklamasi dan pascatambang sebagai bagian integral dari operasi bisnis.
- Ruang lingkup kegiatan reklamasi memberikan celah untuk menghindari tanggung jawab dalam memulihkan lingkungan ke kondisi semula.
- Dana jaminan dirancang sedemikian rupa sehingga tidak memberikan perlindungan lingkungan secara memadai.

Figure 7-4: Dry stack tailings facility and conventional RSF locations

Source: ENFI (undated)

Notes: Image taken from the conventional TSF design report. The blue shaded area is the approximate location and size of the dry stack tailings facility.

Gambar 47. PT Halmahera Persada Lygend (HPL) sedang mempertimbangkan pembangunan tiga fasilitas tailing konvensional untuk menyimpan tailing tambahan setelah kapasitas maksimum fasilitas tailing kering (Dry Stack Tailings Facility/DSTF) tercapai pada pertengahan tahun 2027. Dengan total luas jejak lahan mencapai 1.556 hektare, fasilitas penyimpanan tailing konvensional tersebut akan mencakup area delapan kali lebih besar daripada DSTF yang ada saat ini. SRK Consulting (2022a) menyebut fasilitas tailing konvensional ini sebagai Residue Storage Facilities (RSF) dan menamai tiga fasilitas tersebut sebagai RSF #1, RSF #2, dan RSF #3. Per Desember 2022, fasilitas tailing konvensional ini sudah berada dalam tahap perizinan. Lihat Gambar 38 untuk melihat kontur dari fasilitas tailing konvensional yang ditelusuri pada citra satelit yang juga menunjukkan lokasi DSTF dan empat lokasi pembuangan tailing lainnya. Kontur dari fasilitas tailing konvensional dalam Gambar 38 bersifat perkiraan karena pada peta dari SRK Consulting (2022a), garis-garis tersebut tertutup oleh banyak label.

Alternatif kedua yang lebih berbahaya adalah fasilitas penyimpanan tailing yang difilter akan terus dibangun, tetapi keruntuhan akan dianggap sebagai sesuatu yang tak terhindarkan, sehingga fasilitas tersebut akan dibangun dalam kondisi seolah-olah sudah runtuh. Menurut para pekerja tambang di PT Obi Nickel Cobalt (ONC) di Pulau Obi, rencana pengelolaan 132 juta ton tailing HPAL adalah dengan memfilter tailing tersebut dan menyimpannya secara permanen di area seluas 2.344 hektare. Berdasarkan kapasitas terpasang sebesar 65.000 ton nikel per tahun (lihat Tabel 1a) dan rasio tailing terhadap logam sebesar 133, maka fasilitas tailing yang direncanakan ini akan menampung hasil produksi selama 15 tahun kegiatan penambangan dan pemrosesan HPAL. Yang mengejutkan dari rencana ini adalah luas area tapaknya dibandingkan dengan tapak seluas 195 hektare dari DSTF milik PT Halmahera Persada Lygend (HPL). Jika mengacu pada ketinggian 57 meter dan kapasitas penyimpanan 57,2 juta ton untuk proyek PT HPL, maka ketinggian fasilitas tailing PT ONC diperkirakan hanya sekitar 11 meter. Ketinggian aktualnya akan bergantung pada apakah tersedia lubang tambang atau lembah yang sudah ada untuk menampung tailing, sebagaimana yang membantu menurunkan tinggi DSTF (lihat Gambar 22). Sebagai contoh, jika fasilitas tailing PT ONC dimodelkan sebagai balok persegi panjang di permukaan datar dengan kerapatan tailing padat sebesar 2,0 ton per meter kubik (Cacciuttolo Vargas dan Pérez Campomanes, 2022), maka ketinggiannya hanya sekitar 2,8 meter. Dengan demikian, keruntuhan akan "dicegah" dengan membangun fasilitas penyimpanan tailing yang sangat rendah, atau dengan kata lain: fasilitas tersebut dibangun dalam kondisi seolah-olah sudah runtuh. Meskipun tampak logis, pendekatan ini justru akan menyebabkan kerusakan hutan yang maksimum untuk jumlah tailing tertentu dan tidak dapat dianggap sebagai solusi berkelanjutan.

Alternatif ketiga yang paling berbahaya adalah apabila pemerintah Indonesia dan perusahaan-perusahaan tambang mencapai konsensus bahwa teknologi tailing yang difilter tidak layak diterapkan di Indonesia karena curah hujan dan tingkat kegempaan yang tinggi. Konsensus ini bahkan bisa berkembang menjadi keyakinan bahwa penyimpanan tailing di permukaan tanah tidak layak di Indonesia. Logika yang akan muncul kemudian adalah bahwa satu-satunya pilihan yang tersisa adalah pembuangan tailing ke laut dalam. Sebagaimana telah dibahas sebelumnya, pembuangan tailing ke laut dalam memang sudah sejak awal menjadi niat di proyek PT HPL di Pulau Obi. Untuk mengulangi kembali, hanya satu tahun sebelum pembukaan proyek PT HPL pada tahun 2021, pegawai manajemen PT HPL menulis dalam sebuah publikasi ilmiah yang ditinjau sejawat bahwa, "Penerapan tailing untuk wilayah tropis Halmahera kurang sesuai. Wilayah tropis Halmahera, khususnya Pulau Obi, merupakan wilayah aktif gempa dengan curah hujan 3.000 mm/tahun, dan sekitar ±7.000 penduduk tinggal di desa-desa di hilir. Dengan kondisi ini, biaya konstruksi dan pengendalian air akan sangat tinggi dan secara ekonomi tidak layak untuk proyek tersebut. Oleh karena itu, sisa utama akan dipompa ke DSTP [Deep Sea Tailings Disposal]" (Gultom dan Sianipar, 2020). Publikasi tersebut bahkan menjabarkan rencana pembuangan tailing ke laut dalam. Menurut Gultom dan Sianipar (2020), "DSTP terdiri dari pipa darat sepanjang 15 km dan pipa lepas pantai sepanjang 0,7 km dengan diameter 40 inci dari pabrik pemurnian menuju ke ngarai laut pada kedalaman lebih dari 200 meter di bawah permukaan laut. Tailing akan mengalir dari ujung pipa menuju dasar laut dengan kedalaman 1.000–2.000 meter dari permukaan laut." Bagian selanjutnya dari laporan ini akan membahas sebuah alternatif yang berpotensi aman dan layak, diikuti dengan rekomendasi-rekomendasi khusus kepada pemerintah Indonesia.

SKENARIO ALTERNATIF KE DEPAN

Berdasarkan seluruh isi laporan ini, sulit untuk tidak menyimpulkan bahwa teknologi tailing yang difilter memang tidak dapat diterapkan di Indonesia. Namun pada saat yang sama, sulit juga untuk mengabaikan kesimpulan bahwa belum ada pihak yang benar-benar berupaya maksimal agar teknologi ini berhasil. Kesimpulan terakhir ini didasarkan pada evaluasi terhadap proyek-proyek HPAL yang dijalankan oleh PT Halmahera Persada Lygend (HPL) di Pulau Obi dan PT Huayue Nickel Cobalt (HYNC) serta PT Qing Mei Bang (QMB) New Energy Materials di Pulau Sulawesi. Informasi yang tersedia sangat minim mengenai desain, konstruksi, dan pengoperasian fasilitas penyimpanan tailing yang difilter oleh PT Obi Nickel Cobalt (ONC) di Pulau Obi atau PT Huafei Nickel Cobalt (HFNC) di Pulau Halmahera. Namun demikian, sulit untuk bersikap optimistis terhadap fasilitas-fasilitas yang kurang dikenal ini mengingat kepemilikan antara PT HYNC dan PT ONC saling tumpang tindih, dan PT HYNC serta PT HFNC sama-sama dimiliki mayoritas oleh perusahaan Tiongkok, Zhejiang Huayou Cobalt (lihat Tabel 1a).

Secara singkat, praktik-praktik yang dilakukan di proyek PT HPL nyaris tidak memadai bahkan untuk menjalankan teknologi paling sederhana sekalipun di kondisi yang paling bersahabat. Praktik-praktik tersebut antara lain hampir tidak adanya kontrol kualitas, hampir tidak adanya instrumen pemantauan, dan ketidakpatuhan terhadap desain. Selain itu, perlu ditambahkan pula kegagalan manajemen tingkat atas dalam mengungkapkan pencemaran air tanah kepada publik dan masyarakat terdampak, keputusan konsultan untuk meminimalkan dan menyunting informasi penting terkait genangan di permukaan, serta tidak adanya jawaban terhadap pertanyaan-pertanyaan yang jelas dan relevan. Penulis berpendapat bahwa jalur paling aman ke depan bukanlah dengan menyerah pada teknologi tailing yang difilter, melainkan dengan terus melanjutkan penerapannya namun dengan tekad untuk melaksanakannya dengan benar. Laporan ini ditutup dengan 11 rekomendasi spesifik bagi pemerintah Indonesia.

REKOMENDASI

Laporan ini memberikan rekomendasi spesifik berikut kepada pemerintah Indonesia untuk dilaksanakan secara berurutan:

1) Langkah segera harus diambil untuk melindungi keselamatan pekerja tambang dan masyarakat yang tinggal di hilir fasilitas penyimpanan tailing yang difilter (Dry Stack Tailings Facility/DSTF) milik PT HPL di Pulau Obi.
2) Pembuangan tailing harus dihentikan di semua fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Indonesia.
3) Moratorium harus diberlakukan terhadap penerbitan izin baru untuk fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Indonesia.
4) Izin yang sudah diberikan untuk fasilitas penyimpanan tailing yang difilter namun belum dibangun harus dicabut.
5) Audit keselamatan harus dilakukan terhadap semua fasilitas penyimpanan tailing yang difilter di Indonesia oleh perusahaan konsultan independen yang ditunjuk oleh pemerintah Indonesia, namun pembiayaannya ditanggung oleh pemilik fasilitas tailing tersebut.
6) Indonesia harus menyusun pedoman teknis untuk pembangunan fasilitas penyimpanan tailing yang difilter secara aman dalam konteks Indonesia. Beberapa acuan yang dapat

digunakan antara lain: manual yang dikembangkan oleh Konsorsium Manajemen Tailing BHP Rio Tinto (2024), manual dari AECOM (2023) untuk Kejaksaan Umum Minas Gerais (Brasil), dan bagian relevan dari panduan Tailings Dam Best Safety Practices oleh FEMA ((U.S.) Federal Emergency Management Agency, 2025). Perhatian khusus harus diberikan pada berbagai kekurangan yang terjadi dalam pembangunan fasilitas tailing yang difilter di Indonesia selama ini, seperti pentingnya sistem pemantauan, perlunya rencana penutupan sejak awal perizinan, dan perlunya kontrol kualitas terhadap kadar air geoteknik tailing dan kepadatan kompaksi.

7) Fasilitas tailing yang difilter yang lolos audit keselamatan dapat dioperasikan kembali dengan komitmen untuk mengikuti seluruh ketentuan dalam pedoman Indonesia tersebut.
8) Fasilitas tailing yang difilter yang sebelumnya telah mendapatkan izin dapat dibangun dengan komitmen untuk mematuhi pedoman Indonesia.
9) Izin baru dapat diberikan untuk fasilitas penyimpanan tailing yang difilter dengan syarat mengikuti pedoman teknis Indonesia tersebut.
10) Indonesia harus mengesahkan undang-undang yang melarang pembuangan tailing ke laut dalam (deep sea tailings disposal).
11) Indonesia harus sepenuhnya mengadopsi dokumen panduan *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management*.

TENTANG PENULIS

Dr. Steven H. Emerman meraih gelar B.S. di bidang Matematika dari The Ohio State University, M.A. di bidang Geofisika dari Princeton University, dan Ph.D. di bidang Geofisika dari Cornell University. Dr. Emerman memiliki pengalaman selama 31 tahun dalam mengajar hidrologi dan geofisika, termasuk sebagai Profesor Fulbright di Ekuador dan Nepal, serta telah menerbitkan lebih dari 70 artikel ilmiah yang ditinjau sejawat dalam bidang tersebut. Sejak tahun 2018, Dr. Emerman adalah pemilik Malach Consulting, sebuah lembaga konsultasi yang berspesialisasi dalam mengevaluasi dampak lingkungan dari kegiatan pertambangan bagi perusahaan tambang, lembaga pemerintah, dan organisasi non-pemerintah. Dr. Emerman telah mengevaluasi fasilitas penyimpanan tailing yang direncanakan maupun yang sudah ada di Amerika Utara, Amerika Selatan, Eropa, Afrika, Asia, dan Oseania. Ia juga telah memberikan kesaksian mengenai fasilitas penyimpanan tailing di hadapan Subkomite DPR Amerika Serikat untuk Masyarakat Adat, Parlemen Eropa, Forum Permanen PBB untuk Masalah Masyarakat Adat, Majelis Lingkungan PBB, Komisi Tetap Hak Asasi Manusia DPR Republik Dominika, serta Komite Lingkungan, Iklim, dan Warisan Senat Negara Bagian Minnesota. Dr. Emerman adalah mantan Ketua Subkomite Body of Knowledge dari U.S. Society on Dams dan salah satu penulis dokumen *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management*.

Steven H. Emerman

REFERENSI

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas [Asosiasi Standar Teknis Brasil]), 2017. ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas [Asosiasi Brasil untuk Standar Teknis]), 2017. *Mineração – elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos* [Pertambangan – Penyusunan dan penyajian desain bendungan untuk pembuangan tailing, penahan sedimen, dan penyimpanan air – Persyaratan]: Norma Brasileira ABNT NBR 13.028, ed. ke-3, 22 hlm.

AECOM, 2023. *Report 01 – Technical and Socio-environmental Report – Guidelines for Tailing Piles and Tailing & Overburden Piles* [Laporan Teknis dan Sosial-Lingkungan – Panduan untuk Tumpukan Tailing dan Tumpukan Tailing & Overburden]: Laporan disiapkan untuk Kejaksaan Negeri Minas Gerais – MPMG, Laporan 60695029 – ACM-DM-ZZ-RP-PM-0001-2022, 26 Juni 2023, 150 hlm.

Agência Nacional de Mineração [Badan Pertambangan Nasional], 2025. *SIGBM (Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração)* [Sistem Terintegrasi untuk Manajemen Bendungan Pertambangan]. Tersedia secara daring di: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/acesso-a-sistemas/sistema-integrado-de-gestao-de-barragens-de-mineracao-sigbm-versao-minerador

AidData, 2025. *Project ID: 66200—CDB provides $384 million loan for Phase 1 of Sulawesi Mining Power Station Project in Morowali Industrial Park (Linked to Project ID#61986, #66207, #66216, #69488, #85817)* [CDB memberikan pinjaman sebesar $384 juta untuk Fase 1 Proyek Pembangkit Listrik Pertambangan Sulawesi di Kawasan Industri Morowali]: A Research Lab at William & Mary. Tersedia secara daring di: https://china.aiddata.org/projects/66200/

ANCOLD (Australian National Committee on Large Dams [Komite Nasional Australia untuk Bendungan Besar]), 2012. *Guidelines on tailings dams—Planning, design, construction, operation and closure* [Pedoman tentang bendungan tailing—Perencanaan, desain, konstruksi, operasi, dan penutupan], 84 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.resolutionmineeis.us/sites/default/files/references/ancold-2012.pdf

ANCOLD (Australian National Committee on Large Dams [Komite Nasional Australia untuk Bendungan Besar]), 2019. *Guidelines on tailings dams—Planning, design, construction, operation and closure—Addendum—July 2019* [Pedoman tentang bendungan tailing—Perencanaan, desain, konstruksi, operasi, dan penutupan—Adendum—Juli 2019], 11 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.ancold.org.au/wp-content/uploads/2019/07/Tailings-Guideline-Addendum-July-2019.pdf

Angelo, M., 2022. *Exclusivo: Estrutura da Vallourec que cedeu em MG teve reunião extraordinária, licenciamento expresso e alertas de ambientalistas em sua ampliação* [Eksklusif: Struktur Vallourec yang runtuh di MG menjalani rapat luar biasa, perizinan kilat, dan peringatan dari aktivis lingkungan atas perluasannya]: Observatório da Mineração, 10 Januari 2022. Tersedia secara daring di: https://observatoriodamineracao.com.br/exclusivo-estrutura-da-vallourec-que-cedeu-em-mg-teve-reuniao-extraordinaria-licenciamento-expresso-e-alertas-de-ambientalistas-em-sua-ampliacao/

Argus, 2023. *Huayou, Vale commit to Indonesian Huali MHP project* [Huayou dan Vale berkomitmen pada proyek Huali MHP di Indonesia]: 28 Agustus 2023. Tersedia secara daring di: https://www.argusmedia.com/ja/news-and-insights/latest-market-news/2483610-huayou-vale-commit-to-indonesian-huali-mhp-project

Argus, 2024. *Indonesian coal firm Harum buys nickel processing stake* [Perusahaan batubara Indonesia Harum membeli saham pemrosesan nikel]: 3 April 2024. Tersedia secara daring di: https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2554287-indonesian-coal-firm-harum-buys-nickel-processing-stake

Asian Metal, 2022. *Hanrui Cobalt to build 60,000-metal-ton nickel high-pressure leaching project in Indonesia Huabao Industrial Park* [Hanrui Cobalt akan membangun proyek pelindian tekanan tinggi nikel 60.000 ton logam di Kawasan Industri Huabao, Indonesia]: 22 September 2022. Tersedia secara daring di: https://www.asianmetal.com/news/1856491/Hanrui-Cobalt-to-build-60,000-metal-ton-nickel-high-pressure-leaching-project-in-Indonesia-Huabao-Industrial-Park

Asnawi, A., 2025. *Riset ungkap ribuan orang tewas tertimbun limbah tambang* [Riset mengungkap ribuan orang tewas tertimbun limbah tambang]: Mongabay, 13 April 2025. Tersedia secara daring di: https://www.mongabay.co.id/2025/04/13/riset-ungkap-ribuan-orang-tewas-tertimbun-limbah-tambang/

Baker, E., K. Thygesen, dan B. Haworth, 2025. *Mining and mine tailings in Asia—Moving towards adoption of the Global Industry Standard on Tailings Management* [Pertambangan dan tailing tambang di Asia—Menuju adopsi Standar Industri Global untuk Pengelolaan Tailing]: GRID-Arendal, 68 hlm. Tersedia secara daring di: https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/:s_document/1923/original/AsianTailings_2025.pdf?1747223114

Barrick Gold, 2012. *Tailings Management Standard*, Revisi 2: Referensi Dokumen—BCG-MI-ST-01, Tanggal Terbit Awal—9 Agustus 2012, Tanggal Efektif—7 Maret 2022, 45 hlm. Tersedia secara daring di: https://s25.q4cdn.com/322814910/files/doc_downloads/gov_docs/policies/Tailings_Management_Standard.pdf

Bersihkan Indonesia, 2020. *Untouchable; the vulnerability of reclamation and post-mining guarantees to corruption* [Tak Tersentuh; kerentanan jaminan reklamasi dan pascatambang terhadap korupsi], 20 hlm. Tersedia secara daring di: https://auriga.or.id/resources/reports/64/untouchable-the-vulnerability-of-reclamation-and-post-mining-guarantees-to-corruption

Bhawano, A., 2025. *11,5 juta ton limbah tailing IMIP ancam Sungai Bahodopi* [11,5 juta ton limbah tailing IMIP mengancam Sungai Bahodopi]: Betahita [The World], 22 April 2025. Tersedia secara daring di: https://betahita.id/news/detail/11026/11-5-juta-ton-limbah-tailing-imip-ancam-sungai-bahodopi.html?v=1745280966

BHP Rio Tinto Tailings Management Consortium, 2024. *Filtered stacked tailings—A guide for study managers* [Tailing terfilter bertumpuk—Panduan bagi manajer studi], 134 hlm.

Birol, O., 2023. *Update on Meta Nikel Gördes Operation* [Pembaruan Operasi Meta Nikel Gördes]: Wakil Manajer Umum, Meta Nikel Kobalt Madencilik A.Ş, ALTA 2023, 1–5 Mei 2023, Perth, Australia, presentasi PowerPoint, 37 slide. Tersedia secara daring di:

https://d3e2i5nuh73s15.cloudfront.net/wp-content/uploads/2023/05/ALTA-2023-NCC-3-Paper-Meta-Nikel.pdf

Bodley, A.J. dan C. Vaguener, 2022. *Learnings from dry stacking fine grained nickel residue in the tropics* [Pelajaran dari penumpukan kering residu nikel berbutir halus di daerah tropis]: Tailings and Mine Waste 2022, Denver, Colorado, November 2022, 9 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.researchgate.net/publication/366093867_Learnings_from_Dry_Stacking_Fine_Grained_Nickel_Residue_in_the_Tropics

Bray, J.D., R.B. Sancio, M.F. Riemer, dan T. Durgunoglu, 2004. *Liquefaction susceptibility of fine-grained soils* [Kerentanan pencairan tanah berbutir halus]: Dalam *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Berkeley, CA, 7–9 Januari 2004, hlm. 655–662. Tersedia secara daring di: https://assets-global.website-files.com/63d0fcf37700711149421763/64a28b02a276228b93a24ce1_paperno45.pdf

Business & Human Rights Resource Centre, 2025a. *Indonesia: Residents and workers' safety at risk from several dam failures in Indonesia Morowali Industrial Park where nickel is processed* [Indonesia: Keselamatan warga dan pekerja terancam akibat beberapa kegagalan bendungan di Kawasan Industri Morowali tempat pengolahan nikel]: 28 Maret 2025. Tersedia secara daring di: https://www.business-humanrights.org/en/latest-news/indonesia-tailings-storage-facility-failures-in-imip-causing-death-of-workers-ngo-says/

Business & Human Rights Resource Centre, 2025b. *Zhejiang Huayou Cobalt's response to news coverage on river pollution reportedly caused by flooding of tailings facility in Indonesia* [Tanggapan Zhejiang Huayou Cobalt terhadap pemberitaan tentang pencemaran sungai yang diduga disebabkan oleh banjir fasilitas tailing di Indonesia]: 21 April 2025. Tersedia secara daring di: https://www.business-humanrights.org/en/latest-news/zhejiang-huayou-cobalts-response-to-news-coverage-on-river-pollution-reportedly-caused-by-tailings-facility/

Business & Human Rights Resource Centre, 2025c. *PT. QMB New Energy Material's response to flooding & landslide incident at tailing storage facility located in Indonesia* [Tanggapan PT QMB New Energy Material terhadap insiden banjir dan longsor di fasilitas penyimpanan tailing di Indonesia]: 27 April 2025. Tersedia secara daring di: https://www.business-humanrights.org/en/latest-news/pt-qmb-new-energy-materials-response-to-flooding-landslide-incident-at-tailing-storage-facility-located-in-indonesia/

Cacciuttolo Vargas, C. dan G. Pérez Campomanes, 2022. *Practical experience of filtered tailings technology in Chile and Peru—An environmentally friendly solution* [Pengalaman praktis teknologi tailing terfilter di Chili dan Peru—Solusi yang ramah lingkungan]: *Minerals*, vol. 12, 64 hlm. Tersedia secara daring di: https://doi.org/10.3390/min12070889

Canadian Dam Association, 2013. *Dam safety guidelines 2007 (2013 edition)* [Pedoman keselamatan bendungan 2007 (edisi 2013)], 88 hlm.

Canadian Dam Association, 2019. *Application of dam safety guidelines to mining dams (2019 edition)* [Penerapan pedoman keselamatan bendungan pada bendungan tambang (edisi 2019)], 61 hlm.

Canadian Dam Association, 2021. *Technical Bulletin—Tailings dam breach analysis* [Buletin Teknis—Analisis jebolnya bendungan tailing], 68 hlm.

CBL (Contemporary Brunp Lygend), 2025. *About CBL* [Tentang CBL]. Tersedia secara daring di: http://www.cbl.com.cn/en/Content/488847.html

Center for Science in Public Participation, 2024. *Tailings Dam Failures 1915 - 2024 as of 22Apr24* [Kegagalan Bendungan Tailing 1915–2024 per 22Apr24]: Spreadsheet Excel. Tersedia secara daring di: http://www.csp2.org/tsf-failures-from-1915

Ceria Nugraha Indotama, 2025. *Nickel Cobalt Refining and Processing* [Pemurnian dan Pemrosesan Nikel Kobalt]. Tersedia secara daring di: https://cerindocorp.com/business-nickel-cobalt

Clohan, D. dan E. Kidner, 2022. *Tailings breach studies and inundation mapping* [Studi jebolnya tailing dan pemetaan genangan]: Dalam K.F. Morrison (Ed.), *Tailings management handbook—A life-cycle approach* [Buku Pegangan Pengelolaan Tailing—Pendekatan Siklus Hidup] (hlm. 211–220), Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Englewood, Colorado, 1004 hlm.

CNN Indonesia, 2025. *IMIP sudah pulihkan kawasan yang diterjang banjir bandang* [IMIP telah memulihkan kawasan yang diterjang banjir bandang]: 19 Maret 2025. Tersedia secara daring di: https://www.cnnindonesia.com/nasional/20250319073035-20-1210441/imip-sudah-pulihkan-kawasan-yang-diterjang-banjir-bandang

Crystal, C., C. Hore, dan I. Ezama, 2018. *Filter-pressed dry stacking—Design considerations based on practical experience* [Dry stacking dengan pengepresan filter—Pertimbangan desain berdasarkan pengalaman praktis]: *Tailings and Mine Waste 2018*, 11 hlm. Tersedia secara daring di: https://dxi97tvbmhbca.cloudfront.net/upload/user/image/CCrystal-CHore-IEzama_FilterPressedDryStacking_20182019112819110668 6.pdf

Da Costa, G., 2025. *Morowali under environmental threat from nickel industry tailings—Tanah Merdeka* [Morowali dalam ancaman lingkungan akibat tailing industri nikel—Tanah Merdeka]: *Indonesia Business Post*, 11 April 2025. Tersedia secara daring di: https://indonesiabusinesspost.com/4079/society-environment-and-culture/morowali-under-environmental-threat-from-nickel-industry-tailings-tanah-merdeka

Davies, M., K. Mayhew, dan C. Anderson, 2022. *Chapter 6—Dewatered tailings* [Bab 6—Tailing yang telah dikeringkan]: Dalam K.F. Morrison (Ed.), *Tailings management handbook—A life-cycle approach* [Buku Pegangan Pengelolaan Tailing—Pendekatan Siklus Hidup] (hlm. 85–108), Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Englewood, Colorado, 1004 hlm.

Desinformémonos [Let's Get Informed], 2024. *Denuncian derrame de presa de jales secos de la Minera Cuzcatlán en el río Coyote* [Mereka melaporkan tumpahan dari bendungan tailing kering milik Perusahaan Tambang Cuzcatlán ke Sungai Coyote]: 1 Oktober 2024. Tersedia secara daring di: https://desinformemonos.org/denuncian-derrame-de-presa-de-jales-secos-de-la-minera-cuzcatlan-en-el-rio-coyote/

Destination954, 2025. *TikTok video*: 27 Maret 2025, 0:30. Tersedia secara daring di: https://www.tiktok.com/@destination954/video/7486618507413622034

DoITPoMS [Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science], 2025. *Liquefaction* [Pencairan]. Tersedia secara daring di: https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/granular_materials/liquefaction.php

Durrant, A., 2023. *The rise and rise of Indonesian HPAL – but can it continue?* [Kebangkitan HPAL Indonesia—Namun dapatkah ini terus berlanjut?]: *The Assay*. Tersedia secara

daring di: https://www.theassay.com/articles/analysis/the-rise-and-rise-of-indonesian-hpal-but-can-it-continue/

EDUCA—Servicios para una Educación Alternativa A.C (Asociación Civil) [Layanan untuk Pendidikan Alternatif A.C. (Asosiasi Sipil)], 2024. *Local authorities accuse—Federal Attorney for Environmental Protection has not acted on new mining contamination in Oaxaca* [Pemerintah lokal menuduh—Kejaksaan Federal untuk Perlindungan Lingkungan belum bertindak atas pencemaran tambang baru di Oaxaca]: 8 Oktober 2024. Tersedia secara daring di: https://www.educaoaxaca.org/local-authorities-accuse-federal-attorney-for-environmental-protection-has-not-acted-on-new-mining-contamination-in-oaxaca/

Emerman, S.H., 2021a. *Evaluation of the tailings storage facility for the proposed Savannah Lithium Barroso mine, northern Portugal* [Evaluasi fasilitas penyimpanan tailing untuk tambang Savannah Lithium Barroso yang diusulkan, Portugal utara]: Laporan disusun untuk Povo e Natureza do Barroso, 43 hlm. Tersedia secara daring di: https://unece.org/sites/default/files/2021-10/frCommC186_15.10.2021_annex1.pdf

Emerman, S.H., 2021b. *Testimony of Dr. Steven H. Emerman to the European Parliament Public Hearing on Environmental and Social Impacts of Mining in the EU, December 2, 2021* [Kesaksian Dr. Steven H. Emerman di Sidang Terbuka Parlemen Eropa tentang Dampak Lingkungan dan Sosial Pertambangan di Uni Eropa, 2 Desember 2021]. Tersedia secara daring di: https://www.europarl.europa.eu/cmsdata/243324/Hearing%2002.12.2021%20testimony%20Emerman.pdf

Emerman, S.H., 2022a. *The myth of high environmental standards for mining in the European Union* [Mitos standar lingkungan yang tinggi dalam pertambangan di Uni Eropa]: *EUropainfo—Das Magazin des EU-Umweltbüros* [Majalah Kantor Lingkungan UE], vol. 3/22 (Bergbau und Rohstoffe—Der Mythos vom "Green Mining" [Pertambangan dan Sumber Daya—Mitos "Green Mining"]), hlm. 3–4. Tersedia secara daring di: https://www.eu-umweltbuero.at/assets/EU-Umweltbuero/Magazin-EUropainfo/EUropainfo-3-22.pdf

Emerman, S.H., 2022b. *Prediction of seepage from the Clay Tailings Filter Stack (CTFS) at the Lithium Nevada Thacker Pass mine, northern Nevada* [Prediksi rembesan dari Tumpukan Tailing Terfilter Lempung (CTFS) di tambang Lithium Nevada Thacker Pass, Nevada utara]: Laporan disusun untuk Great Basin Resource Watch, 76 hlm. Tersedia secara daring di: https://gbrw.org/wp-content/uploads/2022/06/Exhibit-4-Thacker_Pass_Report_Emerman_Revised2.pdf

Emerman, S.H., 2023a. *The Minnesota Prove It First bill and the myth of sulfide ore mining without environmental contamination* [RUU Minnesota Prove It First dan mitos pertambangan bijih sulfida tanpa pencemaran lingkungan]: Laporan disusun atas permintaan Friends of the Boundary Waters, 43 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.friends-bwca.org/wp-content/uploads/Prove_It_First_Bill_Report_Emerman_Revised.pdf

Emerman, S.H., 2023b. *Hydrologic aspects of the 2022 Addendum to the Environmental Impact Statement for the DPM lead-zinc mine, North Sumatra, Indonesia* [Aspek hidrologi dari Amandemen 2022 terhadap Analisis Dampak Lingkungan untuk tambang timbal-seng DPM, Sumatera Utara, Indonesia]: Laporan disusun untuk Jaringan Advokasi Tambang,

84 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.inclusivedevelopment.net/wp-content/uploads/2024/06/Expert-review-of-final-2022-DPM-EIA-Addendum_Dr-Steven-Emerman_May-2023.pdf

Emerman, S.H., 2024. *Memo to C. Russell and S. Grieg (Survival International)* [Memo kepada C. Russell dan S. Grieg (Survival International)]: 21 Agustus 2024, 17 hlm.

EnergyData.info, 2020. *Indonesia - Small Hydro GIS Database* [Indonesia - Basis Data GIS Pembangkit Listrik Tenaga Air Skala Kecil]. Tersedia secara daring di: https://energydata.info/dataset/indonesia-small-hydro-gis-database

Espinosa-Gomez, R., S. Gomez-Hernandez, dan P.D. Munro, 2018. *Tailing filtration practices in Mexican gold and silver mines* [Praktik filtrasi tailing di tambang emas dan perak di Meksiko]: *14th AusIMM Mill Operators' Conference 2018*, Brisbane, Queensland, Australia, 29–31 Agustus 2018, 8 hlm.

Fell, R., P. MacGregor, D. Stapledon, G. Bell, dan M. Foster, 2015. *Geotechnical engineering of dams*, edisi ke-2 [Rekayasa geoteknik bendungan, edisi ke-2]: CRC Press, 1348 hlm.

FEMA (Federal Emergency Management Agency (AS)), 2004. *Federal guidelines for dam safety* [Pedoman federal untuk keselamatan bendungan]: April 2004, 63 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema_dam-safety_P-93.pdf

FEMA (Federal Emergency Management Agency (AS)), 2025. *Tailings dam safety best practices* [Praktik terbaik keselamatan bendungan tailing]: Draf Final April 2025 untuk Distribusi Terbatas, 350 hlm.

Fick, S.E. dan R.J. Hijmans, 2017. *WorldClim 2—New 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas* [WorldClim 2—Permukaan iklim resolusi spasial 1 km baru untuk wilayah daratan global]: *International Journal of Climatology*, vol. 37, hlm. 4302–4315. Tersedia secara daring di: https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.5086

Firdaus, F., 2022. *'We are afraid'—Erin Brockovich pollutant linked to global electric car boom* ['Kami takut'—Polutan Erin Brockovich dikaitkan dengan ledakan mobil listrik global]: *The Guardian*, 19 Februari 2022. Tersedia secara daring di: https://www.theguardian.com/global-development/2022/feb/19/we-are-afraid-erin-brockovich-pollutant-linked-to-global-electric-car-boom

Fisher, H. dan B. Grossl, 2023. *OPINION—Overcoming mining waste issues will be key to Indonesia's nickel ambitions* [OPINI—Mengatasi persoalan limbah pertambangan akan menjadi kunci ambisi nikel Indonesia]: *Benchmark Mineral Intelligence*, Juli 2023. Tersedia secara daring di: https://source.benchmarkminerals.com/article/opinion-overcoming-mining-waste-issues-will-be-key-to-indonesias-nickel-ambitions

Foss, M.M. dan J. Koelsch, 2022. *Need nickel? How electrifying transport and Chinese investment are playing out in the Indonesian archipelago* [Butuh nikel? Bagaimana elektrifikasi transportasi dan investasi Tiongkok berdampak di kepulauan Indonesia]: Center for Energy Studies, Baker Institute for Public Policy, Rice University, April 2022, 76 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.bakerinstitute.org/sites/default/files/2022-04/import/research-paper-nickel-041122.pdf

Franks, D.M., M. Stringer, L.A. Torres-Cruz, E. Baker, R. Valenta, K. Thygesen, A. Matthews, J. Howchin dan S. Barrie, 2021. *Tailings facility disclosures reveal stability risks* [Pengungkapan fasilitas tailing mengungkapkan risiko stabilitas]: *Nature Scientific*

Reports, vol. 11, 7 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.nature.com/articles/s41598-021-91384-z

Gagnon, A. dan P. Lind, 2017. *Evaluating the transition to filtered tailings at Cerro Negro* [Evaluasi transisi ke tailing yang difilter di Cerro Negro]: *COM2017—The Conference of Metallurgists hosting World Gold Nickel Cobalt Proceedings*, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 11 hlm.

GEM Co., 2024. *The Third Quarterly Report of 2024* [Laporan Triwulan Ketiga 2024], 19 hlm. Tersedia secara daring di: https://en.gem.com.cn/uploadfiles/2024/10/20241029220940795.pdf

GeotechniCAL, 2025. *Stress in the ground* [Tegangan dalam tanah]. Tersedia secara daring di: http://environment.uwe.ac.uk/geocal/SoilMech/stresses/stresses.htm

Glencore, 2023. *Sustainability Report 2023* [Laporan Keberlanjutan 2023], 80 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.glencore.com/.rest/api/v1/documents/static/be5b0554-2c1d-415d-8072-be6a30d91d79/GLEN-2023-Sustainability-Report.pdf

Government Gazette—Republic of South Africa, 2015. *National Environmental Management: Waste Act, 2008 (Act No. 59 Of 2008)—Regulations regarding the planning and management of residue stockpiles and residue deposits from a prospecting, mining, exploration or production operation* [Undang-Undang Pengelolaan Lingkungan Nasional: Undang-Undang Limbah 2008 (UU No. 59 Tahun 2008)—Peraturan mengenai perencanaan dan pengelolaan timbunan residu dan endapan residu dari kegiatan eksplorasi, penambangan, atau produksi]: Department of Environmental Affairs, No. R. 632, 24 Juli 2015, vol. 601, 20 hlm. Tersedia secara daring di: https://archive.opengazettes.org.za/archive/ZA/2015/government-gazette-ZA-vol-601-no-39020-dated-2015-07-24.pdf

Government of the Republic of Indonesia, 2007. *Tentang Penanggulangan Bencana* [Mengenai Penanggulangan Bencana]: No. 24 Tahun 2007, 50 hlm.

Government of the Republic of Indonesia, 2009. *Tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup* [Mengenai Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup]: No. 32 Tahun 2009, 110 hlm.

Government of the Republic of Indonesia, 2010a. *Tentang Bendungan* [Mengenai Bendungan]: No. 37 Tahun 2010, 105 hlm.

Government of the Republic of Indonesia, 2010b. *Tentang Reklamasi dan Pascatambang* [Mengenai Reklamasi dan Pascatambang]: No. 78 Tahun 2010, 29 hlm.

Government of the Republic of Indonesia, 2021. *Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup* [Mengenai Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup]: No. 22 Tahun 2021, 483 hlm. Tersedia secara daring di: https://peraturan.bpk.go.id/Details/161852/pp-no-22-tahun-2021

Guberman, D., S. Schreiber, dan A. Perry, 2024. *Export restrictions on minerals and metals—Indonesia's export ban of nickel* [Pembatasan ekspor mineral dan logam—Larangan ekspor nikel oleh Indonesia]: Office of Industry and Competitiveness Analysis, Working Paper ICA-104, Februari 2024, 42 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.usitc.gov/publications/332/working_papers/ermm_indonesia_export_ban_of_nickel.pdf

Gultom, T. dan A. Sianipar, 2020. *High-pressure acid leaching—A newly introduced technology in Indonesia* [Pelindian asam bertekanan tinggi—Teknologi yang baru diperkenalkan di

Indonesia]: *The 2019 International Conference on Mining and Environmental Technology*, *IOP Conference Series—Earth and Environmental Science*, vol. 413, 6 hlm. Tersedia secara daring di: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/413/1/012015/pdf?itid=lk_inline_enhanced-template

Hamdam, H., 2025. *Longsor di Kawasan PT IMIP Morowali, 3 Pekerja hilang tertimbun* [Landslide in PT IMIP Morowali Area, 3 workers missing buried]: *Detiksulsel* [South Sulawesi], 22 Maret 2025. Tersedia secara daring di: https://www.detik.com/sulsel/berita/d-7836548/longsor-di-kawasan-pt-imip-morowali-3-pekerja-hilang-tertimbun

Harian Sulteng [Central Sulawesi Daily], 2025. *Yayasan Tanah Merdeka soroti bencana longsor di area penyimpanan limbah tailing PT IMIP* [Tanah Merdeka Foundation highlights landslide disaster in PT IMIP tailings waste storage area]: 23 Maret 2025. Tersedia secara daring di: https://hariansulteng.com/yayasan-tanah-merdeka-soroti-bencana-longsor-di-area-penyimpanan-limbah-tailing-pt-imip/

Harita Nickel dan PT TBP (Trimegah Bangun Persada), 2023. *Kajian geoteknik lereng aktual disposal tailing dam Karo* [Geoteknik lereng terkini bendungan pembuangan tailing Karo]: Memorandum dari Business Improvement kepada Dedy Amrin (Manajer Lingkungan dan Peningkatan Bisnis) dan Primus Priyanto (Kepala Teknik Pertambangan, PT TBP), 31 Januari 2023, 5 hlm.

Hatch, 2020. *PT Halmahera Persada Lygend (HPAL) OBI Nickel Project—Technical Due Diligent Review Proposed Filtered Tailings Stack Disposal* [Proyek Nikel HPAL OBI PT Halmahera Persada Lygend—Ulasan Kajian Teknis atas Usulan Pembuangan Tailing yang Difilter secara Bertumpuk]: Memorandum Proyek dari R. Wong kepada T. Huang, H358687, 18 September 2020, 30 hlm.

Heyokha Brothers, 2024. *The myths surrounding Indonesia's Nickel Revolution—Fact or fiction?* [Mitos seputar Revolusi Nikel Indonesia—Fakta atau fiksi?]: *Emerging Trends Report—Q2 2024*, 18 hlm. Tersedia secara daring di: https://heyokha-brothers.com/wp-content/uploads/2024/08/The%20myths%20of%20Indonesia's%20nickel%20fact%20or%20fiction.pdf?_t=1722506472

Hidayat, T., Z. Zulhan, M.Z. Mubarok, dan E. Sanwani, 2024. *Recent growth of nickel laterite processing in Indonesia* [Pertumbuhan terbaru pengolahan nikel laterit di Indonesia]: Dalam *Proceedings of Alta 2024 Nickel-Cobalt-Copper Sessions* (hlm. 1–18), 27–31 Mei, Perth, Australia, 523 hlm. Tersedia secara daring di: https://d3e2i5nuh73s15.cloudfront.net/wp-content/uploads/2024/07/ALTA-2024-NCC-Paper-FINAL.pdf

Holtz, R.D., W.D. Kovacs, dan T.C. Sheahan, 2011. *An introduction to geotechnical engineering*, edisi ke-2 [Pengantar rekayasa geoteknik, edisi ke-2]: Pearson, 863 hlm.

Hopkins, A. dan D. Kemp, 2021. *Credibility crisis—Brumadinho and the politics of mining industry reform* [Krisis kredibilitas—Brumadinho dan politik reformasi industri pertambangan]: Wolters Kluwer, 176 hlm.

Huayou Cobalt, 2023. *2023 Environmental, Social and Governance (ESG) Report* [Laporan Lingkungan, Sosial, dan Tata Kelola 2023], 66 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.huayou.com/Public/Uploads/uploadfile2/files/20250326/HuayouCobalt2023Environmental,SocialandGovernanceReport.pdf

HydroSHEDS, 2025. *Seamless hydrographic data for global and regional applications* [Data hidrografi tanpa batas untuk aplikasi global dan regional]. Tersedia secara daring di: https://www.hydrosheds.org/

ICMM (International Council on Mining & Metals), 2020. *New Global Industry Standard on Tailings Management aims to improve the safety of tailings facilities in the mining industry* [Standar Industri Global Baru tentang Pengelolaan Tailing bertujuan meningkatkan keselamatan fasilitas tailing dalam industri pertambangan]. Tersedia secara daring di: https://www.icmm.com/en-gb/news/2020/new-global-industry-standard-on-tailings-management

ICMM (International Council on Mining & Metals), 2020. *New Global Industry Standard on Tailings Management aims to improve the safety of tailings facilities in the mining industry* [Standar Industri Global Baru tentang Pengelolaan Tailing bertujuan meningkatkan keselamatan fasilitas tailing dalam industri pertambangan]. Tersedia secara daring di: https://www.icmm.com/en-gb/news/2020/new-global-industry-standard-on-tailings-management

ICMM (International Council on Mining & Metals), 2021. *Tailings management—Good practice guide* [Pengelolaan tailing—Panduan praktik yang baik]: Mei 2021, 128 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.icmm.com/en-gb/guidance/environmental-stewardship/tailings-management-good-practice

ICMM (International Council on Mining & Metals), 2025. *Our Members* [Anggota Kami]. Tersedia secara daring di: https://www.icmm.com/en-gb/our-story/our-members

ICMM-UNEP-PRI (International Council on Mining & Metals–United Nations Environment Programme–Principles for Responsible Investment), 2020. *Global industry standard on tailings management* [Standar industri global tentang pengelolaan tailing]—Agustus 2020, 40 hlm. Tersedia secara daring di: https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-industry-standard-on-tailings-management.pdf

ICOLD (International Commission on Large Dams), 2022. *Tailings dam safety* [Keselamatan bendungan tailing]: Buletin 194, 192 hlm.

IMIP (Indonesia Morowali Industrial Park), 2025a. *PT Huayue Nickel Cobalt*. Tersedia secara daring di: https://imip.co.id/pt-huayue-nickel-cobalt/#

IMIP (Indonesia Morowali Industrial Park), 2025b. *PT QMB New Energy Material*. Tersedia secara daring di: https://imip.co.id/pt-qmb-new-energy-material/

IMIP (Indonesia Morowali Industrial Park), 2025c. *PT Sulawesi Nickel Cobalt*. Tersedia secara daring di: https://imip.co.id/pt-sulawesi-nickel-cobalt/

IMIP (Indonesia Morowali Industrial Park), 2025d. *PT Green Eco Nickel*. Tersedia secara daring di: https://imip.co.id/pt-green-eco-nickel/

IMIP (Indonesia Morowali Industrial Park), 2025e. *PT Seawing New Energy*. Tersedia secara daring di: https://imip.co.id/pt-seawing-new-energy/

IMIP (Indonesia Morowali Industrial Park), 2025f. *PT Honch New Energy*. Tersedia secara daring di: https://imip.co.id/pt-honch-new-energy/

IMIP (Indonesia Morowali Industrial Park), 2025g. *PT Decho New Energy*. Tersedia secara daring di: https://imip.co.id/pt-decho-new-energy/

IMIP (Indonesia Morowali Industrial Park), 2025h. *PT Chengseng New Energy*. Tersedia secara daring di: https://imip.co.id/pt-chengseng-new-energy/

IMIP (Indonesia Morowali Industrial Park), 2025i. *PT ESG New Energy Material*. Tersedia secara daring di: https://imip.co.id/pt-esg-new-energy-material/

IMIP (Indonesia Morowali Industrial Park), 2025j. *PT Indonesia Qingmei Energy Materials*. Tersedia secara daring di: https://imip.co.id/pt-indonesia-qingmei-energy-materials/

IMIP (Indonesia Morowali Industrial Park), 2025k. *PT Meiming New Energy Materials*. Tersedia secara daring di: https://imip.co.id/pt-meiming-new-energy-material/

INAP (International Network for Acid Prevention), 2014. *Global acid rock drainage guide* [Panduan global drainase batuan asam], 473 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.inap.com.au/wp-content/uploads/Global-Acid-Rock-Drainage-Guide.pdf

Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel, 2015. *Report on Mount Polley Tailings Storage Facility breach* [Laporan tentang jebolnya fasilitas penyimpanan tailing Mount Polley]: Laporan kepada Kementerian Energi dan Pertambangan dan Soda Creek Indian Band, 156 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.mountpolleyreviewpanel.ca/sites/default/files/report/ReportonMountPolleyTailingsStorageFacilityBreach.pdf

IndoPremier, 2024. *Metals—Sector Update—08 January 2024* [Logam—Pembaruan Sektor—08 Januari 2024]. Tersedia secara daring di: https://r.ipot.id/?g=r/s/3ci5o8

International Mining, 2022. *Metso Outotec to provide PT Huafei Nickel Cobalt with Planet Positive Larox filters* [Metso Outotec akan menyediakan filter Larox Planet Positive kepada PT Huafei Nickel Cobalt]: 28 Maret 2022. Tersedia secara daring di: https://im-mining.com/2022/03/28/metso-outotec-to-provide-pt-huafei-nickel-cobalt-with-planet-positive-larox-filters/

Jakarta Post, 2025. *One killed, two missing in latest work-related accident at IMIP* [Satu tewas, dua hilang dalam kecelakaan kerja terbaru di IMIP]: 26 Maret 2025. Tersedia secara daring di: https://www.thejakartapost.com/indonesia/2025/03/26/one-killed-two-missing-in-latest-work-related-accident-at-imip.html

Kabar Sulteng [Berita Sulawesi Tengah], 2025a. *Longsor terjang kawasan PT IMIP, Serikat buruh sebut sudah berulang kali, Jumlah korban masih ditelusuri* [Landslide hits PT IMIP area, Labor union says it has happened repeatedly, Number of victims still being investigated]: 23 Maret 2025. Tersedia secara daring di: https://www.kabarsulteng.id/2025/03/23/longsor-terjang-kawasan-pt-imip-serikat-buruh-sebut-sudah-berulang-kali-jumlah-korban-masih-ditelusuri/

Kabar Sulteng [Berita Sulawesi Tengah], 2025b. *3 pekerja tertimbun longsor di kawasan PT IMIP, YTM desak evaluasi Menyeluruh* [3 workers buried in landslide in PT IMIP area, YTM urges comprehensive evaluation]: 24 Maret 2025. Tersedia secara daring di: https://www.kabarsulteng.id/2025/03/24/3-pekerja-tertimbun-longsor-di-kawasan-pt-imip-ytm-desak-evaluasi-menyeluruh/

Klohn Crippen Berger, 2017. *Study of tailings management technologies* [Studi tentang teknologi pengelolaan tailing]: Laporan kepada Asosiasi Pertambangan Kanada dan Program Mine Environment Neutral Drainage (MEND), Laporan MEND 2.50.1, 164 hlm. Tersedia secara daring di: http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2.50.1Tailings_Management_TechnologiesL.pdf

Kuli Tambang Random [Penambang Acak], 2023. *TikTok video*: 14 September 2023, 0:15. Tersedia secara daring di: https://www.tiktok.com/@izxxxl999/video/7278915538158423302

Larrauri, P.C. dan U. Lall, 2018. *Tailings dams failures—Updated statistical model for discharge volume and runout* [Kegagalan bendungan tailing—Model statistik terbaru untuk volume limpasan dan jarak sebaran]: *Environments*, vol. 5. Tersedia secara daring di: doi:10.3390/environments5020028

Leavitt, T., 2025. *Company supplying critical EV metal 'did not disclose' Erin Brockovich pollutant in drinking water* [Perusahaan penyedia logam penting untuk kendaraan listrik tidak mengungkapkan polutan Erin Brockovich dalam air minum]: *The Guardian*, 30 April 2025. Tersedia secara daring di: https://www.theguardian.com/global-development/2025/apr/30/environment-water-pollution-green-transition-indonesia-harita-nickel-metal-mining-electric-vehicles-erin-brockovich-chromium-cr6

Lee, A., 2023. *Indonesia nickel heartland wants to be greener link in EV chain* [Wilayah nikel Indonesia ingin menjadi mata rantai yang lebih hijau dalam rantai pasok kendaraan listrik]: *Bloomberg News*, 24 Juli 2023. Tersedia secara daring di: https://www.mining.com/web/indonesia-nickel-heartland-wants-to-be-greener-link-in-ev-chain/

Lu, L., 2023. *The success of Indonesian nickel and what's next?* [Keberhasilan nikel Indonesia dan apa selanjutnya?]: *The Assay*, 6 November 2023. Tersedia secara daring di: https://www.theassay.com/articles/in-discussion/the-success-of-indonesian-nickel-and-whats-next/

Maest, A.S., J.R. Kuipers, C.L. Travers, dan D.A. Atkins, 2005. *Predicting water quality at hardrock mines—Methods and models, uncertainties, and state-of-the-art* [Prediksi kualitas air di tambang batuan keras—Metode dan model, ketidakpastian, dan praktik terkini]: Buka Environmental dan Kuipers & Associates, Laporan disiapkan atas permintaan Earthworks, 90 hlm. Tersedia secara daring di: https://earthworks.org/cms/assets/uploads/archive/files/publications/PredictionsReportFinal.pdf

Man in Indonesia [曼谈印尼], 2025. *印尼苏拉威西莫罗瓦利山体滑坡1死2失踪, IMIP称是暴雨所致,自由土地基金会关注尾矿废料储存问题* [1 orang tewas dan 2 hilang dalam longsor di Morowali, Sulawesi, Indonesia. IMIP menyatakan disebabkan oleh hujan deras. Yayasan Tanah Merdeka menyoroti masalah penyimpanan limbah tailing]: 26 Maret 2025. Tersedia secara daring di: https://mp.weixin.qq.com/s/mfcQN0jOtF5W-SLaVfw9Jw

Mayangsari, A. dan T.B. Adji, 2015. *Implementation of dam safety in Indonesia* [Pelaksanaan keselamatan bendungan di Indonesia]: *Hydropower '15*, Stavanger, Norwegia, 15–16 Juni 2015, 8 hlm.

MECATER Ingénierie, 2023a. *LinkedIn post* [Postingan LinkedIn]: Tersedia secara daring di: https://www.linkedin.com/posts/mecater-ing%C3%A9nierie_mecater-has-been-awarded-a-contract-by-pt-activity-7008419733259608064-YQPi

MECATER Ingénierie, 2023b. *LinkedIn post* [Postingan LinkedIn]: Tersedia secara daring di: https://www.linkedin.com/posts/mecater-ing%C3%A9nierie_mecater-has-been-awarded-a-contract-by-eramet-activity-6988479881240014848-Vc34

Media Alkhairaat, 2025a. *Yayasan Tanah Merdeka—Morowali terancam limbah tailing industri nikel* [Yayasan Tanah Merdeka—Morowali terancam oleh limbah tailing industri nikel]: 9 April 2025. Tersedia secara daring di: https://media.alkhairaat.id/yayasan-tanah-merdeka-morowali-terancam-limbah-tailing-industri-nikel/

Media Alkhairaat, 2025b. *Penghargaan Proper biru IMIP dikecam aktivis* [Penghargaan Proper Biru IMIP dikritik oleh aktivis]: 4 Mei 2025. Tersedia secara daring di: https://media.alkhairaat.id/penghargaan-proper-biru-imip-dikecam-aktivis/

Merdeka Battery Materials, 2024. *Merdeka Battery Materials—Investor Presentation—August 2024* [Presentasi Investor—Agustus 2024]: Presentasi PowerPoint, 24 slide. Tersedia secara daring di: https://assets.merdekabattery.com/dist/documents/MBM%20Investor%20Presentation%20(August%202024).pdf

Merdeka Battery Materials, 2025. *HPAL*. Tersedia secara daring di: https://merdekabattery.com/en/business/hpal

Merdeka Copper Gold, 2024. *Merdeka Copper Gold—Investor Presentation—June 2024* [Presentasi Investor—Juni 2024]: 33 slide. Tersedia secara daring di: https://merdekacoppergold.com/wp-content/uploads/2024/06/MDKA-Investor-Presentation-June-2024.pdf

Mining.com, 2022. *Goro nickel mine faces increased regulation after tailings leak* [Tambang nikel Goro menghadapi peningkatan regulasi setelah kebocoran tailing]: 30 November 2022. Tersedia secara daring di: https://www.mining.com/web/goro-nickel-mine-faces-increased-regulation-after-tailings-leak/

Ministry of Energy, Mines and Low Carbon Innovation (British Columbia), 2024. *Code Guidance—Health, Safety and Reclamation Code for Mines in British Columbia—Part 10 – Tailings Storage Facilities (TSF) and Dams* [Panduan Kode—Kode Kesehatan, Keselamatan, dan Reklamasi untuk Tambang di British Columbia—Bagian 10 – Fasilitas Penyimpanan Tailing dan Bendungan]: Juni 2024, 122 hlm. Tersedia secara daring di: https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/mineral-exploration-mining/documents/health-and-safety/code-review/bc_code_guidance_doc_part_10_tsfs_and_dams_guidance_document_june2024_final_v2.pdf

Ministry of Environment and Forestry (Republic of Indonesia), 2020. *Tentang Pemanfaatan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun* [Regarding the Utilization of Hazardous and Toxic Waste]: No. P.18/MENLHK/SETJEN/KUM.1/8/2020, 41 hlm.

Ministry of Public Works and People's Housing (Republic of Indonesia), 2015. *Tentang Bendungan* [Regarding Dams]: No. 27/PRT/M/2015, 70 hlm.

Minnesota Department of Natural Resources, 2021. *March 12, 2021 TMM [Twin Metals Minnesota] responses to DNR-RGU [Department of Natural Resources-Responsible Governmental Unit] comments* [Tanggapan TMM terhadap komentar DNR-RGU, 12 Maret 2021], 172 hlm. Tersedia secara daring di: https://files.dnr.state.mn.us/input/environmentalreview/twinmetals/pd/tmm-responses-to-dnr-rgu-comments-march-2021.pdf

MOMI (Minerba One Map Indonesia), 2023. *IUP (Izin Usaha Pertambangan [Mining License]) 2023* [Peta Shapefile Izin Usaha Pertambangan 2023]: Akses data pada 15 Agustus 2023 di: https://momi.minerba.esdm.go.id/gisportal/home/webmap/viewer.html?useExisting=1 (tidak lagi tersedia)

Montesori, J., 2025. *Buruh berduka! Kecelakaan kerja di fasilitas penyimpanan limbah PT IMIP Morowali, satu pekerja ditemukan tewas, dua masih dicari* [Workers mourn! Work accident at PT IMIP Morowali waste storage facility, one worker found dead, two still

wanted]: *IndoTren.com*, 24 Maret 2025. Tersedia secara daring di: https://www.indotren.com/nasional/32214826950/buruh-berduka-kecelakaan-kerja-di-fasilitas-penyimpanan-limbah-pt-imip-morowali-satu-pekerja-ditemukan-tewas-dua-masih-dicari

Moore, E., 2025. *Multiple dams fail at Indonesian nickel-mining facilities* [Beberapa bendungan gagal di fasilitas penambangan nikel Indonesia]: *Earthworks Blog*, 28 Maret 2025. Tersedia secara daring di: https://earthworks.org/blog/multiple-dams-fail-at-indonesian-nickel-mining-facilities/

Moreno, J.J., S. Kendall, dan A. Ortiz, 2018. *Dewatering options for management of fine gold tailings in Western Australian goldfields* [Opsi dewatering untuk pengelolaan tailing emas halus di wilayah pertambangan Australia Barat]: Dalam Jewell, R.J. dan A.B. Fourie (eds.), *Paste 2018—Proceedings of the 21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia, hlm. 413–424. Tersedia secara daring di: https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1805_34_Moreno/

Morrill, J., 2022. *The unfolding disaster in Brazil—A warning of what's to come* [Bencana yang terus berkembang di Brasil—Peringatan tentang apa yang akan datang]: *Earthworks Blog*, 25 Januari 2022. Tersedia secara daring di: https://earthworks.org/blog/the-unfolding-disaster-in-brazil-a-warning-of-whats-to-come/

Morrill, J., 2025. *A string of tailings dam failures shows the urgency of putting safety first* [Rangkaian kegagalan bendungan tailing menunjukkan pentingnya menempatkan keselamatan sebagai prioritas]: *Earthworks Blog*, 31 Maret 2025. Tersedia secara daring di: https://earthworks.org/blog/a-string-of-tailings-dam-failures-shows-the-urgency-of-putting-safety-first/

Morrill, J., D. Chambers, S. Emerman, R. Harkinson, J. Kneen, U. Lapointe, A. Maest, B. Milanez, P. Personius, P. Sampat, dan R. Turgeon, 2022. *Safety first—Guidelines for responsible mine tailings management* [Keselamatan utama—Pedoman untuk pengelolaan tailing tambang yang bertanggung jawab]: Earthworks, MiningWatch Canada, dan London Mining Network: Versi 2.0, Mei 2022, 55 hlm. Tersedia secara daring di: https://earthworks.org/wp-content/uploads/2022/05/Safety-First-Safe-Tailings-Management-V2.0-final.pdf

Morrison, K.F. dan B. Byler, 2022. *Chapter 38—Risk assessment and risk management* [Bab 38—Penilaian dan manajemen risiko]: Dalam K.F. Morrison (Ed.), *Tailings management handbook—A life-cycle approach* [Buku pedoman pengelolaan tailing—Pendekatan daur hidup] (hlm. 749–780), Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Englewood, Colorado, 1004 hlm.

Moskowitz, E., A. Aviram, S. Vardar, dan K. Dörrer, 2025. *Major nickel supplier Harita knew about water contamination at Indonesian operation for a decade* [Pemasok nikel utama Harita mengetahui pencemaran air di operasinya di Indonesia selama satu dekade]: *OCCRP (Organized Crime and Corruption Reporting Project)*, 30 April 2025. Tersedia secara daring di: https://www.occrp.org/en/investigation/major-nickel-supplier-harita-knew-about-water-contamination-at-indonesian-operation-for-a-decade

MRDC, 2025. *Ramu Nickel Cobalt Project* [Proyek Nikel Kobalt Ramu]. Tersedia secara daring di: https://site.mrdc.com.pg/?page_id=3704

Nangoy, F., 2023. *Huayou Cobalt to add at least 500,000 T of nickel capacity in Indonesia* [Huayou Cobalt akan menambah setidaknya 500.000 ton kapasitas nikel di Indonesia]:

Reuters, 31 Mei 2023. Tersedia secara daring di: https://www.reuters.com/article/business/huayou-cobalt-to-add-at-least-500000-t-of-nickel-capacity-in-indonesia-idUSL1N37S0RJ/

Nangoy, F. dan F. Ungku, 2021. *Exclusive—Facing green pressure, Indonesia halts deep-sea mining disposal* [Eksklusif—Menghadapi tekanan lingkungan, Indonesia menghentikan pembuangan tailing di laut dalam]: *Reuters*, 5 Februari 2021. Tersedia secara daring di: https://www.reuters.com/article/world/exclusivefacing-green-pressure-indonesia-halts-deep-sea-mining-disposal-idUSKBN2A50VG/

Nangoy, F. dan M. Nguyen, 2024. *Indonesian nickel firm in talks with Glencore ahead of 2025 listing* [Perusahaan nikel Indonesia dalam pembicaraan dengan Glencore menjelang pencatatan saham 2025]: *Reuters*, 12 Juni 2024. Tersedia secara daring di: https://www.mining.com/web/indonesia-nickel-firm-ceria-nugraha-in-talks-with-glencore-ahead-of-2025-listing/

Nassar, N.T., G.W. Lederer, J.L. Brainard, A.J. Padilla, dan J.D. Lessard, 2022a. *Rock-to-metal ratio—A foundational metric for understanding mine wastes* [Rasio batu terhadap logam—Metode dasar untuk memahami limbah pertambangan]: *Environmental Science & Technology*, vol. 56, hlm. 6710–6721. Tersedia secara daring di: https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/acs.est.1c07875

Nassar, N.T., G.W. Lederer, J.L. Brainard, A.J. Padilla, dan J.D. Lessard, 2022b. *Supporting information for Rock-to-metal ratio—A foundational metric for understanding mine wastes* [Informasi pendukung untuk rasio batu terhadap logam—Metode dasar untuk memahami limbah pertambangan]: *Environmental Science & Technology*, vol. 56, hlm. 6710–6721. Tersedia secara daring di: https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/acs.est.1c07875

Narendra, B.H., C.A. Siregar, M. Turjaman, A. Hidayat, H.H. Rachmat, B. Mulyanto, R. Maharani, Y. Rayadin, R. Prayudyaningsih, T.W. Yuwati, R. Prematuri, dan A. Susilowati, 2021. *Managing and reforesting degraded post-mining landscape in Indonesia—A Review* [Pengelolaan dan penghijauan kembali lanskap pascatambang yang rusak di Indonesia—Sebuah Tinjauan]: *Land*, vol. 10, 29 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.mdpi.com/2073-445X/10/6/658

Nathanson, J.A., 2007. *Basic environmental technology—Water supply, waste management, and pollution control* [Teknologi lingkungan dasar—Penyediaan air, pengelolaan limbah, dan pengendalian pencemaran], ed. ke-5: Pearson College Division, 534 hlm.

National Standards of the People's Republic of China, 2020. *尾矿库安全规程 [Peraturan keselamatan untuk kolam tailing]*: GB 39496-2020, Diterbitkan 11 Oktober 2020, Berlaku mulai 1 September 2021, 30 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.chinamine-safety.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/zcfg/hybz_01/fmks/202012/P020201223407382392566.pdf

Nickel Industries, 2025. *Operations—Nickel Operations in Indonesia* [Operasi—Operasi Nikel di Indonesia]. Tersedia secara daring di: https://nickelindustries.com/operations/?show=rkef-operations

NHM Gosowong Gold Mine, 2025. *Underground Mining* [Pertambangan Bawah Tanah]. Tersedia secara daring di: https://www.nhm.co.id/en/mining-operation/underground-mining/

NOAA (U.S.) National Oceanic and Atmospheric Administration), 2025. *Climate Data Online: National Centers for Environmental Information* [Data Iklim Daring: Pusat Informasi Lingkungan Nasional]. Tersedia secara daring di: https://www.ncei.noaa.gov/cdo-web/datasets

Oboni, F. dan C. Oboni, 2020. *Tailings dam management for the twenty-first century—What mining companies need to know and do to thrive in our complex world* [Manajemen bendungan tailing untuk abad ke-21—Apa yang perlu diketahui dan dilakukan oleh perusahaan tambang untuk berkembang dalam dunia yang kompleks]: Springer Nature Switzerland, 278 hlm.

Observatório da Mineração [Observatorium Pertambangan], 2022. *Exclusivo—Imagens aéreas do deslizamento na Mina Pau Branco da Vallourec em MG* [Eksklusif—Gambar udara longsor di Tambang Pau Branco milik Vallourec di MG]. Tersedia secara daring di: https://www.youtube.com/watch?v=BT6FqaT18vo

Pakiding, R., 2025a. TikTok video: 27 Maret 2025, 0:48. Tersedia secara daring di: https://www.tiktok.com/@eunike.sendi.ramp/video/7486506647532178693

Pakiding, R., 2025b. TikTok video: 27 Maret 2025, 0:46. Tersedia secara daring di: https://www.tiktok.com/@eunike.sendi.ramp/video/7486371626158787895

Petley, D., 2022. *Pau Branco—Another significant mining-related landslide in Brazil* [Pau Branco—Satu lagi longsor signifikan terkait tambang di Brasil]: *The Landslide Blog*, American Geophysical Union, 11 Januari 2022. Tersedia secara daring di: https://blogs.agu.org/landslideblog/2022/01/11/pau-branco-1/

Petley, D., 2024. *The 7 December 2024 mine waste landslide at Turmalina Mine in Brazil* [Longsor limbah tambang 7 Desember 2024 di Tambang Turmalina, Brasil]: *The Landslide Blog*, American Geophysical Union, 16 Desember 2024. Tersedia secara daring di: https://eos.org/thelandslideblog/turmalina-mine-1

Petley, D., 2025a. *A fatal tailings landslide at Fatufia in Sulawesi in Indonesia—On Saturday, a tailings landslide occurred in Indonesia, killing three excavator operators* [Longsor tailing fatal di Fatufia, Sulawesi, Indonesia—Pada hari Sabtu, terjadi longsor tailing di Indonesia yang menewaskan tiga operator ekskavator]: *The Landslide Blog*, American Geophysical Union, 24 Maret 2025. Tersedia secara daring di: https://eos.org/thelandslideblog/fatufia-1

Petley, D., 2025b. *Continued uncertainty, but very real concerns, about mining related landslides in Morowali, Indonesia* [Ketidakpastian yang terus berlanjut, namun kekhawatiran nyata tentang longsor terkait pertambangan di Morowali, Indonesia]: *The Landslide Blog*, American Geophysical Union, 28 Maret 2025. Tersedia secara daring di: https://eos.org/thelandslideblog/marowali-1

Pinto, J., 2014. *Project management, governance, and the normalization of deviance* [Manajemen proyek, tata kelola, dan normalisasi penyimpangan]: *International Journal of Project Management*, vol. 32, hlm. 376–387.

Prihatini, Z. dan B.P. Jatmiko, 2025. *Tiga pekerja tertimbun longsor di kawasan IMIP, dua di antaranya tewas* [Three workers buried in landslide in IMIP area, two of them die]: *Kompas.com*, 10 April 2025. Tersedia secara daring di: https://lestari.kompas.com/read/2025/04/10/150257786/tiga-pekerja-tertimbun-longsor-di-kawasan-imip-dua-di-antaranya-tewas

Pristiandaru, D.L., 2025. *Morowali jadi langganan Banjir, Walhi serukan moratorium tambang nikel* [Morowali becomes a flood-prone area, Walhi calls for nickel mining moratorium]: *Kompas.com—Jernih Melihat Dunia*, 18 Maret 2025. Tersedia secara daring di: https://lestari.kompas.com/read/2025/03/18/070000186/morowali-jadi-langganan-banjir-walhi-serukan-moratorium-tambang-nikel#google_vignette

PT Halmahera Persada Lygend, 2022. *Dari Obi untuk Indonesia* [From Obi for Indonesia]: *Environmental, Social, & Governance Report—2021*, 144 hlm. Tersedia secara daring di: https://hpalnickel.com/keberlanjutan/keberlanjutan#navgreen-selector

PT Halmahera Persada Lygend, 2023. *2022 Sustainability Update Report* [Laporan Pembaruan Keberlanjutan 2022]: 13 Oktober 2023, 31 hlm. Tersedia secara daring di: https://hpalnickel.com/keberlanjutan/keberlanjutan#navgreen-selector

PT Halmahera Persada Lygend, 2024. *2023 Sustainability Update Report* [Laporan Pembaruan Keberlanjutan 2023]: 29 November 2024, 84 hlm. Tersedia secara daring di: https://hpalnickel.com/keberlanjutan/keberlanjutan#navgreen-selector

PT Huayue Nickel Cobalt, 2021. *2021 Environmental, Social and Governance (ESG) Report* [Laporan Lingkungan, Sosial, dan Tata Kelola (ESG) 2021], 29 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.huayou.com/Public/Uploads/uploadfile2/files/20230824/PTHuayueNickelCobalt2021Environment,SocialandGovernanceESGReport.pdf

PT Lapi ITB, 2020. *Final Report—Engineering Design—Dry Stack Tailing Facility—PT Halmahera Persada Lygend—Halmahera Selatan, Maluku Utara, Indonesia* [Laporan Akhir—Desain Rekayasa—Fasilitas Tailing Kering—PT Halmahera Persada Lygend—Halmahera Selatan, Maluku Utara, Indonesia]: Laporan disusun untuk PT Halmahera Persada Lygend, Agustus 2020, 155 hlm.

PT Lapi ITB, 2022. *Final Report—Engineering Design—Dry Stack Tailing Facility—PT Halmahera Persada Lygend—South Halmahera, North Maluku, Indonesia* [Laporan Akhir—Desain Rekayasa—Fasilitas Tailing Kering—PT Halmahera Persada Lygend—Halmahera Selatan, Maluku Utara, Indonesia]: Laporan disusun untuk PT Halmahera Persada Lygend, November 2022, 46 hlm.

PT Obi Nickel Cobalt, 2025. *ONC*. Tersedia secara daring di: https://obinickelcobalt.com/id

PT Trimegah Bangun Persada, 2023a. *Sustainability Report 2023—Laporan Keberlanjutan 2023*, 270 hlm. Tersedia secara daring di: https://tbpnickel.com/en/sustainability-report-2023

PT Trimegah Bangun Persada, 2023b. *Response to Washington Post Article* [Tanggapan terhadap Artikel Washington Post]: 6 Oktober 2023. Tersedia secara daring di: https://tbpnickel.com/investor-relations/disclosure-information/article/response-to-washington-post-article

Reemeyer, H.C.L., 2022. *Chapter 3—Mineral and tailings processing* [Bab 3—Pengolahan mineral dan tailing]: Dalam K.F. Morrison (Ed.), *Tailings management handbook—A life-cycle approach* (hlm. 21–39), Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Englewood, Colorado, 1004 hlm.

Reuters, 2025. *Indonesia's largest nickel processor of Morowali unscathed by floods* [Pengolah nikel terbesar Indonesia di Morowali tidak terdampak banjir]: 18 Maret 2025. Tersedia secara daring di: https://www.reuters.com/world/asia-pacific/indonesias-largest-nickel-processor-morowali-unscathed-by-floods-2025-03-19/

Ribero, H., J. Holman, dan L. Tang, 2021. *Rising EV-grade nickel demand fuels interest in risky HPAL process* [Meningkatnya permintaan nikel untuk kendaraan listrik mendorong ketertarikan pada proses HPAL yang berisiko]: *S&P Global*, 3 Maret 2021. Tersedia secara daring di: https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/blog/metals/030321-nickel-hpal-technology-ev-batteries-emissions-environment-mining

Rio Tinto, 2020. *Group procedure – D5 – Management of tailings and water storage facilities v1.2* [Prosedur Grup – D5 – Manajemen fasilitas penyimpanan tailing dan air]: HSEC-C-14, Disetujui November 2020, Berlaku 1 Januari 2021, Dapat diaudit mulai 1 Juli 2021, 32 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.riotinto.com/-/media/Content/Documents/Sustainability/Corporate-policies/RT-Management-tailings-water-storage-procedure.pdf?rev=de446fc5d65742b4bf6d597a2eb30ae1

Riskope, 2022. *Recent Failure at Pau Branco Mine, MG, Brazil* [Kegagalan Terkini di Tambang Pau Branco, MG, Brasil]. Diakses pada 19 Agustus 2022 di: https://www.riskope.com/2022/01/13/recent-failure-at-pau-branco-mine-mg-brazil/ (tidak tersedia lagi)

Robertson, P.K., L. de Melo, D.J. Williams, dan G.W. Wilson, 2019. *Report of the expert panel on the technical causes of the failure of Feijão Dam I—December 12, 2019* [Laporan panel ahli tentang penyebab teknis kegagalan Bendungan Feijão I—12 Desember 2019]: Laporan disusun untuk Vale S.A., 81 hlm. Tersedia secara daring di: https://bdrb1investigationstacc.z15.web.core.windows.net/assets/Feijao-Dam-I-Expert-Panel-Report-ENG.pdf

Russell, C., S. Grieg, dan C. Pearce, 2024. *Driven to the edge—How the demand for electric cars is destroying uncontacted Indigenous people's lives and lands in Indonesia* [Didorong ke Tepian—Bagaimana permintaan mobil listrik menghancurkan kehidupan dan tanah masyarakat adat yang tak terhubung di Indonesia]: *Survival International*, November 2024, 46 hlm. Tersedia secara daring di: https://assets.survivalinternational.org/documents/2684/original-3c8dda9a3227299a6d33458706fe76e6.pdf

Sanderson, H., 2022. *Nickel drama highlights Tsingshan's role in energy transition* [Drama nikel menyoroti peran Tsingshan dalam transisi energi]: *Dialogue Earth*, 13 Mei 2022. Tersedia secara daring di: https://dialogue.earth/en/business/nickel-drama-highlights-tsingshans-role-in-energy-transition/

Sangadji, A., 2024. *HPAL—A new challenge for the environment in Indonesia—A focus on nickel as a raw material of electric vehicle batteries* [HPAL—Tantangan baru bagi lingkungan di Indonesia—Fokus pada nikel sebagai bahan baku baterai kendaraan listrik]: *The Action for Ecology and People Emancipation (AEER)*, 70 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.aeer.or.id/en/hpal-a-new-challenge-for-the-environment-in-indonesia/

Sangadji, A., M.F. Ngoyo, dan P. Ginting, 2019. *Road to ruin—Challenging the sustainability of nickel-based production for electric vehicle batteries* [Jalan menuju kehancuran—Menguji keberlanjutan produksi berbasis nikel untuk baterai kendaraan listrik]: *Rosa Luxemburg Stiftung, Dialogue Programme Climate Justice*, 236 hlm. Tersedia secara daring di:

https://www.rai.it/dl/doc/2023/11/19/1700402970903_I%20rapporti%20su%20filiera%20del%20nichel%20indonesiana%20-%20Report.pdf

Sangadji, A. dan P. Ginting, 2023. *Multinational corporations and nickel downstreaming in Indonesia* [Perusahaan multinasional dan hilirisasi nikel di Indonesia]: M. Adzania (penerjemah), *Action for Ecology and People Emancipation (Perkumpulan Aksi Ekologi dan Emansipasi Rakyat - AEER)*, September 2023, 92 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.aeer.or.id/wp-content/uploads/2023/10/Arianto_Sangadji_25_Juli_2023-Layouted.pdf

Saputra, A.R., C. Faliana, M.A. Durahman, dan P. Ginting, 2023. *Halmahera dilemma in the midst of nickel industry* [Dilema Halmahera di tengah industri nikel]: *Perkumpulan Aksi Ekologi dan Emansipasi Rakyat (AEER)*, Juli 2023, 120 hlm. Tersedia secara daring di: https://media.business-humanrights.org/media/documents/Halmahera-Dilemma-in-the-Midst-of-Nickel-Industry.pdf

Scharer, J.M., L. Bolduc, C.M. Pettit, dan B.E. Halbert, 2000. *Limitations of acid-base accounting for predicting acid rock drainage* [Keterbatasan perhitungan asam-basa untuk memprediksi pengaliran batuan asam]: Dalam *Proceedings from the Fifth International Conference on Acid Rock Drainage*, ICARD 2000, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, hlm. 591–601.

Schnaid, F., L.G.F.S. de Mello, dan B. Dzialoszynski, 2020. *Guidelines and recommendations on minimum factors of safety for slope stability of tailings dams* [Pedoman dan rekomendasi tentang faktor keamanan minimum untuk kestabilan lereng bendungan tailing]: *Soils and Rocks*, vol. 43, hlm. 369–395. Tersedia secara daring di: https://www.researchgate.net/publication/347741840_Guidelines_and_recommendations_on_minimum_factors_of_safety_for_slope_stability_of_tailings_dams

Seed, R.B., K.O. Cetin, R.E.S. Moss, A.M. Kammerer, J. Wu, J.M. Pestana, M.F. Riemer, R.B. Sancio, J.D. Bray, R.E. Kayen, dan A. Faris, 2003. *Recent advances in soil liquefaction engineering—A unified and consistent framework* [Kemajuan terbaru dalam rekayasa likuifaksi tanah—Kerangka kerja yang terpadu dan konsisten]: *Earthquake Engineering Research Center*, Laporan No. EERC 2003-06, 72 hlm. Tersedia secara daring di: https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1007&context=cenv_fac

Sengani, F. dan D. Allopi, 2022. *Accuracy of two-dimensional limit equilibrium methods in predicting stability of homogenous road-cut slopes* [Akurasi metode kesetimbangan batas dua dimensi dalam memprediksi kestabilan lereng jalan homogen]: *Sustainability*, vol. 14, 26 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.mdpi.com/2071-1050/14/7/3872

Senversa, 2020. *Detailed Site Investigation—Former Bulong Mine Site, Bulong Road, Bulong, WA* [Investigasi Lokasi Terperinci—Bekas Lokasi Tambang Bulong, Jalan Bulong, Bulong, WA]: Laporan disusun untuk Department of Mines, Industry Regulation and Safety, 100 Plain Street, East Perth, WA 6004—18 Juni 2020, 907 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.wa.gov.au/system/files/2025-03/detailed-site-investigation.pdf

Sherritt International Corporation, 2025. *2024 Annual Report* [Laporan Tahunan 2024], 139 hlm. Tersedia secara daring di: https://s2.q4cdn.com/343762060/files/doc_financials/2024/ar/Sherritt-Intl_ANNUAL-REPORT-FINAL.pdf

Shibayama, K., T. Yokogawa, H. Sato, M. Enomoto, O. Nakai, T. Ito, F. Mizuno, dan Y. Hattori, 2016. *Taganito HPAL Plant Project* [Proyek Pabrik HPAL Taganito]: *Minerals Engineering*, vol. 88, hlm. 61–65.

Silva, E., 2023. *Indonesia's nickel processing boom raises questions over tailings disposal* [Ledakan pemrosesan nikel di Indonesia menimbulkan pertanyaan tentang pembuangan tailing]: *S&P Global*, 17 April 2023. Tersedia secara daring di: https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/news-insights/articles/2023/4/indonesia-s-nickel-processing-boom-raises-questions-over-tailings-disposal-75180844

Sinaga, H.D.P., R.N. Pramugar, dan A. Wirawan, 2020. *Reconstruction of criminal provisions for non-tax state revenue—A case study in the mining sector in Indonesia* [Rekonstruksi ketentuan pidana untuk penerimaan negara bukan pajak—Studi kasus di sektor pertambangan di Indonesia]: *Ayer Journal*, vol. 27, hlm. 141–154. Tersedia secara daring di: https://www.researchgate.net/publication/344493591_Reconstruction_of_Criminal_Provisions_for_Non-Tax_State_Revenue_A_Case_Study_in_the_Mining_Sector_in_Indonesia

SMM, 2022. *Huayou Cobalt plans to invest in the construction of Huashan Nickel-Cobalt through its wholly-owned subsidiary* [Huayou Cobalt berencana berinvestasi dalam pembangunan Huashan Nickel-Cobalt melalui anak perusahaan yang dimiliki sepenuhnya]: 21 Juni 2022. Tersedia secara daring di: https://news.metal.com/newscontent/101867749/huayou-cobalt-plans-to-invest-in-the-construction-of-huashan-nickel-cobalt-through-its-wholly-owned-subsidiary

Souisa, H., 2023. *'What's the point of a boat if there are no fish?'* ['Apa gunanya perahu jika tidak ada ikan?']: *ABC News*, 21 Oktober 2023. Tersedia secara daring di: https://www.abc.net.au/news/2023-10-22/indonesias-electric-vehicle-battery-nickel-rush/102862362

Spence, E., 2024. *Indonesian coal miner Harum Energy buys stake in nickel plant* [Perusahaan tambang batu bara Indonesia Harum Energy membeli saham di pabrik nikel]: *Bloomberg News*, 1 April 2024. Tersedia secara daring di: https://www.mining.com/web/indonesian-coal-miner-harum-energy-buys-stake-in-nickel-plant/

Spiller, E. dan R. Dunne, 2017. *Reducing water usage in gold treatment—What is possible* [Mengurangi penggunaan air dalam pengolahan emas—Apa yang mungkin dilakukan]: *COM2017—The Conference of Metallurgists hosting World Gold Nickel Cobalt Proceedings*, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 10 hlm.

SRK Consulting, 2022a. *Final—Independent Technical Assessment Report on the Mineral Assets of PT Trimegah Bangun Persada, Indonesia—Project Green ITAR, Obi Island, Sulawesi, Indonesia—PT Trimegah Bangun Persada* [Laporan Penilaian Teknis Independen atas Aset Mineral PT Trimegah Bangun Persada, Indonesia—Proyek Green ITAR, Pulau Obi, Sulawesi, Indonesia—PT Trimegah Bangun Persada]: Laporan disiapkan untuk PT Trimegah Bangun Persada, File disimpan sebagai TBP001_Independent_Technical Assessment Report_Rev9.pdf, 19 Desember 2022, 214 hlm.

SRK Consulting, 2022b. *Independent Technical Assessment Report on the Mineral Assets of PT Trimegah Bangun Persada, Indonesia—Tailings—Draft* [Laporan Penilaian Teknis Independen atas Aset Mineral PT Trimegah Bangun Persada, Indonesia—Tailing—Draf]: Laporan disiapkan untuk PT Trimegah Bangun Persada, File disimpan sebagai

TBP001_Independent Technical Assessment Report_DRAFT_Tailings_Infrastructure_Rev1.pdf, Desember 2022, 31 hlm.

SRK Consulting, 2022c. *Independent Technical Assessment Report on the Mineral Assets of PT Trimegah Bangun Persada, Indonesia—Tailings—Draft* [Laporan Penilaian Teknis Independen atas Aset Mineral PT Trimegah Bangun Persada, Indonesia—Tailing—Draf]: Laporan disiapkan untuk PT Trimegah Bangun Persada, File disimpan sebagai TBP001_Independent Technical Assessment Report_Rev1_Draft.pdf, Desember 2022, 24 hlm.

SRK Consulting, 2022d. *Draft—Independent Technical Assessment Report on the Mineral Assets of PT Trimegah Bangun Persada, Indonesia—Project Green ITAR, Obi Island, Sulawesi, Indonesia—PT Trimegah Bangun Persada* [Draf—Laporan Penilaian Teknis Independen atas Aset Mineral PT Trimegah Bangun Persada, Indonesia—Proyek Green ITAR, Pulau Obi, Sulawesi, Indonesia—PT Trimegah Bangun Persada]: Laporan disiapkan untuk PT Trimegah Bangun Persada, File disimpan sebagai TBP001_Independent Technical Assessment Report_Rev2.pdf, 16 Desember 2022, 233 hlm.

SRK Consulting, 2022e. *Draft—Independent Technical Assessment Report on the Mineral Assets of PT Trimegah Bangun Persada, Indonesia—Project Green ITAR, Obi Island, Sulawesi, Indonesia—PT Trimegah Bangun Persada* [Draf—Laporan Penilaian Teknis Independen atas Aset Mineral PT Trimegah Bangun Persada, Indonesia—Proyek Green ITAR, Pulau Obi, Sulawesi, Indonesia—PT Trimegah Bangun Persada]: Laporan disiapkan untuk PT Trimegah Bangun Persada, File disimpan sebagai TBP001_Independent Technical Assessment Report_Rev8_clean.pdf, 19 Desember 2022, 214 hlm.

SRK Consulting, 2022f. *Draft—Independent Technical Assessment Report on the Mineral Assets of PT Trimegah Bangun Persada, Indonesia—Project Green ITAR, Obi Island, Sulawesi, Indonesia—PT Trimegah Bangun Persada* [Draf—Laporan Penilaian Teknis Independen atas Aset Mineral PT Trimegah Bangun Persada, Indonesia—Proyek Green ITAR, Pulau Obi, Sulawesi, Indonesia—PT Trimegah Bangun Persada]: Laporan disiapkan untuk PT Trimegah Bangun Persada, File disimpan sebagai TBP001_Independent Technical Assessment Report_Rev8A_clean.pdf, 19 Desember 2022, 214 hlm.

SRK Consulting, 2022g. *Draft—Independent Technical Assessment Report on the Mineral Assets of PT Trimegah Bangun Persada, Indonesia—Project Green ITAR, Obi Island, Sulawesi, Indonesia—PT Trimegah Bangun Persada* [Draf—Laporan Penilaian Teknis Independen atas Aset Mineral PT Trimegah Bangun Persada, Indonesia—Proyek Green ITAR, Pulau Obi, Sulawesi, Indonesia—PT Trimegah Bangun Persada]: Laporan disiapkan untuk PT Trimegah Bangun Persada, File disimpan sebagai TBP001_Independent Technical Assessment Report_Rev8A_trackchanges.pdf, 19 Desember 2022, 214 hlm.

Tampi, A.A.N., 2024. *From Dirt to Gold—Bagaimana green mining mentransformasi proses ekstraksi mineral* [Dari Tanah ke Emas—Bagaimana pertambangan hijau mentransformasi proses ekstraksi mineral]: *PEP BANDUNG Getme Majalah Geologi, Tambang, dan Metalurgi*, vol. 3, hlm. 88–93. Tersedia secara daring di: https://pepbandung.ac.id/uploads/PUBLIKASI/GETME_v2.pdf

Tan, R., D.M. Sijabat, dan J. Irwandi, 2023. *Clean cars, hidden toll—To meet EV demand, industry turns to technology long deemed hazardous—Indonesia is richly endowed with nickel, but refining this crucial mineral poses a daunting environmental challenge* [Mobil bersih, beban tersembunyi—Untuk memenuhi permintaan kendaraan listrik, industri

beralih ke teknologi yang lama dianggap berbahaya—Indonesia kaya akan nikel, tetapi pemurniannya menimbulkan tantangan lingkungan yang berat]: *Washington Post*, 10 Mei 2023. Tersedia secara daring di: https://www.washingtonpost.com/world/interactive/2023/ev-nickel-refinery-dangers/

Taplin, J., 2017. *Move fast and break things—How Facebook, Google, and Amazon cornered culture and undermined democracy* [Bergerak Cepat dan Merusak—Bagaimana Facebook, Google, dan Amazon Menguasai Budaya dan Melemahkan Demokrasi]: Little, Brown and Company, 320 hlm.

TBP (Trimegah Bangun Persada) dan Harita Nickel, 2025. *Shareholding Structure* [Struktur Pemegang Saham]. Tersedia secara daring di: https://tbpnickel.com/about-us/shareholding-structure

Teraskabar.id—*Bacaan Utama di Era Digital* [Berita.id—Bacaan Utama di Era Digital], 2025. *Warga Bahodopi langganan banjir, korban pertambangan nikel yang masif di Morowali* [Warga Bahodopi langganan banjir, korban dari masifnya pertambangan nikel di Morowali]: 18 Maret 2025. Tersedia secara daring di: https://teraskabar.id/warga-bahodopi-langganan-banjir-korban-pertambangan-nikel-yang-masif-di-morowali/

TribunPalun.com, 2025. *Yayasan Tanah Merdeka desak pemerintah evaluasi izin penyimpanan tailing PT IMIP Morowali* [Yayasan Tanah Merdeka mendesak pemerintah mengevaluasi izin fasilitas penyimpanan tailing PT IMIP Morowali]: 24 Maret 2025. Tersedia secara daring di: https://palu.tribunnews.com/2025/03/24/yayasan-tanah-merdeka-desak-pemerintah-evaluasi-izin-fasilitas-penyimpanan-tailing-pt-imip?page=2

Twin Metals Minnesota, 2025. *Dry Stack Tailings Storage* [Penyimpanan Tailing Kering Bertumpuk]. Tersedia secara daring di: https://www.twin-metals.com/learning-center/dry-stack-tailings-storage/

Ulrich, B.F. dan J.G. Coffin, 2017. *Characterization of unsaturated tailings & its effects on liquefaction* [Karakterisasi tailing tak jenuh dan dampaknya terhadap likuifaksi]: *Tailings and Mine Waste 2017*, 10 hlm. Tersedia secara daring di: http://knightpiesold.com/es/noticias/publicaciones/characterization-of-unsaturated-tailings-its-effects-on-liquefaction/

UNEP (United Nations Environment Program), The Church of England, GRID-Arendal, dan Council on Ethics—Swedish National Pension Fund, 2025. *Global Tailings Portal* [Portal Tailings Global]. Tersedia secara daring di: https://tailing.grida.no/

University of Victoria Environmental Law Centre, 2019. *Waste Disposal & Management: BC Mining Law Reform* [Pembuangan & Pengelolaan Limbah: Reformasi Hukum Pertambangan di British Columbia], 12 hlm. Tersedia secara daring di: https://reformbcmining.ca/wp-content/uploads/2019/05/BCMLR-Waste-Disposal-and-Management.pdf

USACE-HEC (U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center), 2003. *Application of paleohydrology to Corps flood frequency analysis* [Penerapan Paleohidrologi untuk Analisis Frekuensi Banjir Korps]: RD-47, 34 hlm. Tersedia secara daring di: http://www.hec.usace.army.mil/publications/ResearchDocuments/RD-47.pdf

USGS (U.S. Geological Survey), 2025a. *Nickel Statistics and Information* [Statistik dan Informasi Nikel]. Tersedia secara daring di: https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/nickel-statistics-and-information

USGS (U.S. Geological Survey), 2025b. *Cobalt Statistics and Information* [Statistik dan Informasi Kobalt]. Tersedia secara daring di: https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/cobalt-statistics-and-information

Vale, 2023. *Shaping sustainability—Reach higher* [Mewujudkan keberlanjutan—Melangkah lebih tinggi]: Laporan Tahunan 2023, 432 hlm. Tersedia secara daring di: https://vale.com/documents/d/guest/pt-vale-laporan-tahunan-2023

Vale, 2025. *IGP Pomalaa*. Tersedia secara daring di: https://vale.com/fi/indonesia-growth-projects-pomalaa

Vardar, S. dan K. Dörrer, 2025. *The hidden cost of Indonesia's nickel boom* [Biaya tersembunyi dari ledakan nikel Indonesia]: DW, 30 April 2025. Tersedia secara daring di: https://www.dw.com/en/leaked-documents-reveal-the-hidden-cost-of-indonesias-nickel-boom/a-72390311

Vaughan, D., 1996. *The Challenger launch decision—Risky technology, culture, and deviance at NASA* [Keputusan Peluncuran Challenger—Teknologi Berisiko, Budaya, dan Penyimpangan di NASA]: University of Chicago Press, Chicago, 592 hlm.

Vick, S. G., 2017. *Dam safety risk—From deviance to diligence* [Risiko Keselamatan Bendungan—Dari Penyimpangan ke Ketekunan]: *Geo-Risk 2017*, hlm. 19–30.

Wicaksono, R.A., 2025. *Banjir berulang, tambang nikel di Morowali diminta dievaluasi* [Banjir berulang, tambang nikel di Morowali diminta untuk dievaluasi]: *Betahita* [Dunia], 19 Maret 2025. Tersedia secara daring di: https://betahita.id/news/detail/10979/banjir-berulang-tambang-nikel-di-morowali-diminta-dievaluasi.html?v=1742342447

Woodward-Clyde, 1996. *Cawse Nickel Project—Consultative Environmental Review* [Proyek Nikel Cawse—Tinjauan Lingkungan Konsultatif]: Laporan disiapkan untuk Centaur Mining and Exploration Limited, 147 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.epa.wa.gov.au/sites/default/files/PER_documentation/A1001_R0825_CER_0.pdf

World Construction Network, 2023. *Anugrah Neo and Gotion to set up HPAL plant in Sulawesi* [Anugrah Neo dan Gotion akan membangun pabrik HPAL di Sulawesi]: 14 September 2023. Tersedia secara daring di: https://www.worldconstructionnetwork.com/news/anugrah-neo-hpal-indonesia/?cf-view

World Gold Council, 2019. *Responsible Gold Mining Principles* [Prinsip Penambangan Emas yang Bertanggung Jawab]: September 2019, 16 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.gold.org/industry-standards/responsible-gold-mining

Yasya, H.R., M.S. Abfertiawan, T.H. Gultom, P. Gunardi dan M. Syahroni, 2024. *Water availability of Akelamo River, Obi Island, South Halmahera* [Ketersediaan air Sungai Akelamo, Pulau Obi, Halmahera Selatan]: *The 7th Environmental Technology and Management Conference (ETMC 2023)*, 22 hlm. Tersedia secara daring di: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2024/15/e3sconf_etmc2024_03015/e3sconf_etmc2024_03015.html

Yayasan Tanah Merdeka (YTM) [Free Land Foundation], 2025a. *Tentang kecelakaan kerja di fasilitas penyimpanan limbah (tailing) di PT Indonesia Morowali Industrial Park* [Regarding work accidents at the waste storage facility (tailing) at PT Indonesia Morowali Industrial Park]: Siaran Pers, 3 hlm., 23 Maret 2025.

Yayasan Tanah Merdeka (YTM) [Free Land Foundation], 2025b. *Morowali di bawah ancaman tailing industri nikel* [Morowali under threat from nickel industry tailings]: Siaran Pers, 7 hlm., 8 April 2025.

Zhejiang Huayou Cobalt, 2024. *Letter from B. Lee (Head of ESG & Sustainability) to B. Adams (Climate Rights International)* [Surat dari B. Lee (Kepala ESG & Keberlanjutan) kepada B. Adams (Climate Rights International)], 7 hlm. Tersedia secara daring di: https://cri.org/wp-content/uploads/2024/01/The-response-of-Huayou-Cobalt.pdf