

Manajemen Risiko Fasilitas Filtered Tailings Menggunakan Metode FMEA: Studi Kasus Tambang Emas PT. ABC

Khairul Afandi ^{1✉}, Tri Joko Wahyu Adi ²

(1, 2) Program Studi Magister Manajemen Teknologi, Sekolah Interdisiplin Manajemen dan Teknologi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

Abstrak: Tailing merupakan limbah hasil pengolahan bijih yang memiliki risiko signifikan terhadap aspek teknis dan lingkungan, sehingga PT.ABC merencanakan pembangunan fasilitas filtered tailings (dry stack) sebagai solusi keterbatasan Tailings Storage Facility (TSF) eksisting. Penelitian ini bertujuan menilai risiko pada fasilitas tersebut menggunakan metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) yang dikombinasikan dengan Fault Tree Analysis (FTA). FMEA dilakukan melalui identifikasi mode kegagalan, penilaian severity, occurrence, detection, serta perhitungan Risk Priority Number (RPN) berdasarkan data literatur, kuesioner, dan Focus Group Discussion (FGD). Hasil penelitian mengidentifikasi 24 mode kegagalan, dengan 6 di antaranya memiliki prioritas tinggi, serta mengelompokkan penyebab kegagalan ke dalam tiga kluster utama yaitu geoteknik, hidrologi dan drainase, serta lingkungan dan geokimia. Penerapan mitigasi menunjukkan penurunan risiko yang signifikan dengan rata-rata RPN sebesar 71% hingga mencapai kategori dapat diterima, sehingga hasil penelitian ini dapat menjadi dasar dalam penyusunan desain, spesifikasi teknis, risk register, dan sistem manajemen risiko guna mendukung praktik pertambangan yang aman, efisien, dan berkelanjutan.

Abstract: Tailings represent a by-product of mineral processing that poses significant technical and environmental risks; therefore, PT.ABC plans to develop filtered tailings (dry stack) facility to address the limited capacity of the existing Tailings Storage Facility (TSF). This study aims to assess the risks associated with the proposed facility using a combined Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and Fault Tree Analysis (FTA) approach, involving the identification of potential failure modes, evaluation of severity, occurrence, and detection, and calculation of the Risk Priority Number (RPN) based on literature review, questionnaires, and expert Focus Group Discussions (FGD). The results identify 24 potential failure modes, with 6 categorized as high-priority risks, and reveal three principal clusters of failure causes: geotechnical, hydrological and drainage, and environmental and geochemical factors. The implementation of mitigation measures results in a significant average RPN reduction of 71%, bringing the risks to an acceptable level. These findings provide practical contributions to the development of engineering design, technical specifications, risk registers, and corporate risk management systems, thereby supporting safe, efficient, and sustainable mining practices.

Article history:

Received: 12 June 2026

Revised: 22 July 2026

Accepted: 24 July 2026

Published: 26 July 2026

Kata kunci:

tailing tambang, tailing hasil penyaringan, analisis mode dan dampak kegagalan (FMEA), penilaian risiko, keberlanjutan pertambangan

Keyword:

mine tailings, filtered tailings, failure mode and effect analysis (FMEA), risk assessment, mining sustainability

This is an open-access article under the [CC-BY-SA License](#).



How to cite: Afandi, K., & Adi, T. K. W. (2026). Manajemen Risiko Fasilitas Filtered Tailings Menggunakan Metode FMEA: Studi Kasus Tambang Emas PT. ABC. RESWARA: Jurnal Riset Ilmu Teknik, 4(3), 595–612. <https://doi.org/10.70716/reswara.v4i3.600>

PENDAHULUAN

Industri pertambangan logam mulia memiliki kontribusi signifikan terhadap perekonomian, namun juga menghasilkan limbah tailing dalam jumlah besar yang memerlukan pengelolaan yang aman dan berkelanjutan. Dalam konsep penambangan berkelanjutan, kinerja industri tidak hanya diukur dari aspek ekonomi, tetapi juga dari kemampuannya mengelola dampak lingkungan dan sosial yang ditimbulkan selama siklus operasi pertambangan. Azapagic (2004) mengembangkan kerangka indikator

pembangunan berkelanjutan untuk industri pertambangan yang menekankan pentingnya pengelolaan limbah, pengendalian risiko lingkungan, dan perlindungan terhadap pemangku kepentingan sebagai bagian integral dari praktik pertambangan yang berkelanjutan. Tailing merupakan material sisa dari proses pemisahan mineral berharga yang berpotensi menimbulkan dampak lingkungan dan risiko kegagalan fasilitas penyimpanan jika tidak dikelola dengan baik (Franks et al., 2021). Oleh karena itu, pengelolaan tailing menjadi isu kritis dalam praktik pertambangan modern, terutama dalam konteks keberlanjutan dan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan.

PT.ABC yang mengelola penambangan emas di Indonesia memiliki fasilitas Tailings Storage Facility (TSF) eksisting diproyeksikan hanya mampu menampung tailing hingga tahun 2028, sehingga diperlukan pengembangan fasilitas baru untuk mendukung keberlanjutan operasi. Salah satu alternatif yang direncanakan adalah penggunaan metode filtered tailings atau dry stacking. Filtered tailings adalah limbah tambang yang telah mengalami proses pemisahan air dengan menggunakan teknologi penyaringan. Filtered tailings menghasilkan material yang memiliki kandungan padatan lebih dari 80% (Cacciuttolo & Atencio, 2023). Filtered tailings dinilai memiliki keunggulan dalam efisiensi penggunaan air, pengurangan risiko geoteknik, serta kemudahan reklamasi pascatambang (Burden & Wilson, 2023a; Lupo & Hall, 2010). Namun demikian, sistem dry stacking tetap memiliki potensi kegagalan, seperti gangguan proses filtrasi, instabilitas timbunan akibat curah hujan ekstrem, serta risiko seismik dan operasional jangka panjang (Kossoff et al., 2014).

Penerapan filtered tailings memiliki tantangan teknis dan operasional, terutama yang berkaitan dengan pengendalian kadar air, stabilitas timbunan, sistem drainase, serta pengaruh kondisi iklim dan seismik terhadap kinerja fasilitas (Burden & Wilson, 2023b). Keberhasilan implementasi filtered tailings sangat bergantung pada kualitas desain geoteknik yang disesuaikan dengan kondisi lokasi spesifik. Cacciuttolo et al. (2026) menunjukkan bahwa perancangan dry stacking pada kondisi topografi kompleks dengan kemiringan hingga 10% dan aktivitas seismik tinggi (PGA 0,3 g) membutuhkan pendekatan pemadatan berlapis yang ketat agar struktur timbunan mencapai stabilitas geoteknik yang memadai dan meminimalkan risiko likuifaksi. Temuan ini menegaskan bahwa filtered tailings, meskipun lebih aman dibandingkan TSF konvensional, tetap memerlukan penilaian risiko yang komprehensif sejak tahap perencanaan. Curah hujan tinggi dan peningkatan tekanan pori dapat menyebabkan penurunan stabilitas timbunan dan memicu deformasi lereng apabila sistem drainase tidak dirancang secara memadai. Selain itu, keberadaan material sulfida pada tailing juga berpotensi menghasilkan acid mine drainage (AMD) yang dapat mencemari lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik (Lottermoser, 2010).

Dalam penerapan filtered tailings perlu dilakukan analisis risiko terlebih dahulu. Risiko dapat didefinisikan sebagai ketidakpastian yang berkaitan dengan konsekuensi dari suatu aktivitas, baik berupa ancaman maupun peluang. Risiko memerlukan pengelolaan sistematis untuk mencapai tujuan (Aven, 2016). Berbagai metode analisis risiko telah diterapkan dalam industri pertambangan, seperti Hazard and Operability Study (HAZOP) dan Fault Tree Analysis (FTA). Namun, beberapa metode tersebut umumnya membutuhkan data historis kegagalan yang memadai agar dapat menghasilkan evaluasi risiko yang akurat (Tubis et al., 2020). Kompleksitas sistem pertambangan yang melibatkan faktor teknis, manusia, dan lingkungan menyebabkan pendekatan manajemen risiko perlu dilakukan secara komprehensif dan berbasis sistem (Hao & Nie, 2022).

Dalam konteks teknologi filtered tailings yang relatif baru, Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) menjadi pendekatan yang relevan karena bersifat preventif dan mampu mengidentifikasi

potensi kegagalan secara sistematis meskipun dengan keterbatasan data historis (dos Santos et al., 2012). Selain itu, pengembangan pendekatan FMEA dalam sektor pertambangan juga menunjukkan bahwa metode ini mampu mendukung proses manajemen risiko sesuai prinsip evaluasi risiko modern, khususnya untuk sistem tambang yang memiliki kompleksitas tinggi (Pavlovic et al., 2023).

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) merupakan metode yang banyak digunakan karena mampu mengidentifikasi mode kegagalan secara sistematis melalui parameter severity, occurrence, dan detection (Stamatis, 2019). Selain itu, FMEA dinilai efektif untuk menganalisis dan mengelola risiko pada sistem yang kompleks, termasuk fasilitas penyimpanan tailing, karena mampu mengidentifikasi potensi kegagalan, metode deteksi, serta tindakan pengendalian sebelum berkembang menjadi insiden yang lebih serius. Pendekatan ini mendukung pengambilan keputusan mitigasi secara lebih proaktif pada tahap awal pengelolaan risiko (Fernández-Iglesias et al., 2015). Schafer et al. (2021) mengembangkan kerangka Geotechnical Failure Modes and Effects Analysis untuk menilai risiko geoteknik pada fasilitas tailing. Kerangka tersebut digunakan untuk mengidentifikasi mode kegagalan potensial, mengevaluasi kemungkinan dan konsekuensi kegagalan, serta menentukan tingkat risiko yang memerlukan tindakan pengendalian atau analisis lebih lanjut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan FMEA dapat berfungsi sebagai alat penyaringan yang efektif untuk mengidentifikasi risiko prioritas dan mendukung proses pengambilan keputusan dalam pengelolaan fasilitas tailings sepanjang siklus hidupnya.

Selain FMEA, Fault Tree Analysis (FTA) juga banyak digunakan untuk menganalisis hubungan sebab-akibat dan akar penyebab kegagalan secara hierarkis. FTA memungkinkan identifikasi kombinasi kejadian yang dapat memicu terjadinya kegagalan sistem sehingga memudahkan penyusunan strategi mitigasi yang lebih efektif. Integrasi FMEA dan FTA dinilai mampu memberikan pendekatan analisis risiko yang lebih komprehensif karena tidak hanya menentukan prioritas risiko, tetapi juga menjelaskan jalur kegagalan dan hubungan antar penyebab kegagalan (dos Santos et al., 2012).

FMEA tidak hanya memetakan tingkat keparahan, peluang kejadian, dan kemampuan deteksi suatu kegagalan melalui perhitungan Risk Priority Number (RPN), tetapi juga mendorong diskusi lintas disiplin untuk menentukan prioritas mitigasi secara praktis. Meskipun banyak diterapkan di sektor manufaktur dan infrastruktur, penggunaan FMEA untuk menganalisis risiko sistem filtered tailings masih sangat terbatas, terutama dalam konteks pertambangan Indonesia. Belum terdapat penelitian yang secara khusus memetakan mode kegagalan pada subsistem filtrasi, penimbunan (stacking), dan disposisi (co-disposal) pada fasilitas filtered tailings di Indonesia.

Berdasarkan kajian terhadap penelitian terdahulu, masih terdapat keterbatasan dalam penerapan metode manajemen risiko pada fasilitas filtered tailings, khususnya di Indonesia. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada aspek desain geoteknik, evaluasi stabilitas timbunan, atau pengelolaan lingkungan secara parsial, sementara pendekatan yang mengintegrasikan identifikasi mode kegagalan, prioritas risiko, serta analisis hubungan sebab-akibat pada fasilitas filtered tailings masih terbatas. Selain itu, belum terdapat penelitian yang secara spesifik mengevaluasi risiko fasilitas filtered tailings pada tambang emas di Indonesia dengan mempertimbangkan karakteristik kondisi tropis, kompleksitas geoteknik, sistem pengelolaan air, dan potensi risiko geokimia secara terpadu. Oleh karena itu, kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan kombinasi Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan Fault Tree Analysis (FTA) untuk membangun model evaluasi risiko komprehensif pada fasilitas filtered tailings tahap perencanaan di tambang emas Indonesia.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan penilaian risiko menggunakan pendekatan FMEA pada fasilitas penimbunan filtered tailings di PT.ABC. Penelitian ini berfokus pada identifikasi dan analisis mode kegagalan potensial pada seluruh subsistem utama serta menyusun rekomendasi mitigasi yang aplikatif. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan praktik manajemen risiko pertambangan yang lebih aman, adaptif, dan berkelanjutan di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif untuk mengidentifikasi, menilai, dan memprioritaskan risiko pada fasilitas filtered tailings di Tambang Emas PT. ABC. Metode utama yang digunakan adalah Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) yang dikombinasikan dengan Fault Tree Analysis (FTA) untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan secara sistematis. FMEA merupakan metode preventif yang efektif dalam mengevaluasi potensi kegagalan melalui parameter severity, occurrence, dan detection serta perhitungan Risk Priority Number (RPN) untuk menentukan prioritas mitigasi (dos Santos et al., 2012).

Pengumpulan data dilakukan melalui kombinasi data primer dan sekunder. Data sekunder diperoleh dari dokumen teknis perusahaan, seperti desain fasilitas, standar operasional prosedur (SOP), serta laporan geoteknik dan lingkungan. Data primer diperoleh melalui wawancara, penyebaran kuesioner, dan Focus Group Discussion (FGD) dengan para ahli yang memiliki pengalaman di bidang tailing, geoteknik, dan manajemen risiko. Instrumen kuesioner disusun menggunakan skala Likert 1–5 untuk menilai parameter severity, occurrence, dan detection pada setiap mode kegagalan. Penggunaan kombinasi data primer berbasis expert judgment dan data sekunder teknis dalam penelitian ini didukung oleh preseden yang telah diterapkan pada fasilitas tailing serupa (Schafer et al., 2022) menunjukkan bahwa dalam penerapan FMEA pada fasilitas tailing oil sands, wawancara dengan para profesional industri dan tinjauan literatur yang komprehensif merupakan langkah kunci dalam mengidentifikasi bahaya, pemicu, mode kegagalan, dan ketidakpastian yang terkait, terutama ketika data historis kegagalan aktual dari fasilitas yang sama belum tersedia.

Untuk memastikan kualitas instrumen penelitian, dilakukan uji validitas dan reliabilitas. Uji validitas dilakukan menggunakan korelasi Pearson, di mana setiap item dinyatakan valid apabila nilai koefisien korelasi lebih besar dari nilai r -tabel. Untuk memastikan konsistensi instrumen penelitian, dilakukan uji reliabilitas menggunakan koefisien Cronbach's Alpha. Reliabilitas digunakan untuk mengukur sejauh mana instrumen menghasilkan data yang konsisten ketika digunakan pada objek yang sama. Nilai Cronbach's Alpha sebesar 0,70 atau lebih secara luas digunakan sebagai ambang batas reliabilitas yang dapat diterima (acceptable reliability) dalam penelitian empiris Hussey et al. (2025). Oleh karena itu, instrumen pada penelitian ini dinyatakan reliabel apabila memiliki nilai Cronbach's Alpha $> 0,70$.

Identifikasi mode kegagalan dilakukan pada seluruh tahapan proses filtered tailings, meliputi proses filtrasi, pengangkutan, dan penimbunan (dry stacking). Setiap mode kegagalan dianalisis untuk menentukan penyebab dan dampaknya terhadap sistem, kemudian dinilai menggunakan parameter FMEA untuk menghitung nilai RPN. Mode kegagalan dengan nilai RPN tertinggi ditetapkan sebagai prioritas utama mitigasi. Selanjutnya, dilakukan Fault Tree Analysis (FTA) terhadap mode kegagalan

prioritas untuk mengidentifikasi akar penyebab secara hierarkis dan mengelompokkan faktor penyebab ke dalam klaster utama.

Tahap akhir penelitian adalah penyusunan rekomendasi mitigasi yang divalidasi melalui FGD, serta perhitungan ulang nilai RPN untuk memperoleh risiko residual. Pendekatan ini menghasilkan penilaian risiko yang komprehensif dan aplikatif sebagai dasar penyusunan desain teknis, risk register, dan sistem manajemen risiko fasilitas filtered tailing.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi Mode Kegagalan

Risiko-risiko yang diidentifikasi dalam penelitian ini diturunkan secara langsung dari rangkaian proses utama pada sistem filtered tailings yang direncanakan untuk diterapkan di Tambang Emas PT. ABC. Secara umum, proses filtered tailings pada penelitian ini dibagi menjadi tiga kelompok utama, yaitu proses filtrasi tailing, proses pengangkutan filtered tailings, dan proses penimbunan filtered tailings dengan sistem co-disposal. Masing-masing proses memiliki konsekuensi risiko yang berbeda sehingga perlu diuraikan secara sistematis ke dalam sub-sistem atau aspek risiko yang lebih rinci. Gambar 1 menunjukkan proses filtered tailings pada Tambang Emas PT. ABC.



Gambar 1. Sistem dan proses filtered tailings

Proses pengelolaan tailing dalam sistem ini tidak hanya dipandang sebagai rangkaian aktivitas operasional, tetapi juga sebagai rantai proses yang sarat dengan potensi risiko pada setiap tahapannya. Oleh karena itu, setiap fase dianalisis tidak hanya dari sisi teknis, tetapi juga dari perspektif identifikasi failure mode, penyebab, dan dampaknya terhadap sistem secara keseluruhan.

Tabel 1. Daftar mode kegagalan dalam proses *filtered tailings*

Sistem / Proses	Sub Sistem / Aspek Risiko	Kode	Identifikasi Risiko / <i>Failure Mode</i>	
Filtrasi Tailing	A1 Pengentalan (<i>thickening</i>)	A1.1	Kadar padatan <i>underflow</i> tidak memenuhi spesifikasi	
	A2 Filtrasi	A2.1	Kadar air <i>cake</i> melebihi target operasi	
		A2.2	<i>Cake</i> tidak bisa <i>release</i> dari plat filtrasi	
		A2.3	Terjadi blok material pada saat <i>feeding</i>	
		A2.4	Banyak <i>slurry tailing</i> tidak mengalami terfiltrasi	
		A2.5	<i>Slurry tailings</i> keluar dari chamber filtrasi	
		A2.6	<i>Dry tailings bunker</i> penuh	
Pengangkutan Tailing	B1 Sistem Pengangkutan	B1.1	Tumpahan pada titik transfer	
		B1.2	<i>Dump truck</i> mengalami amblas saat pengangkutan	
		B1.3	Akses jalan terputus	
Penimbunan Tailing (<i>Dry Stacking</i>)	C1 Penimbunan pemadatan	dan	C1.1	Kepadatan lapisan tidak tercapai
			C1.2	Kegagalan kestabilan lereng timbunan dan likuifaksi
			C1.3	Erosi pada permukaan atau lereng timbunan
	C2 Pengelolaan air		C2.1	Kapasitas sistem pengelak/ <i>runoff</i> tidak memadai
			C2.2	Kegagalan sistem drainase internal
			C2.3	Air bawah tanah mengalami kontaminasi dari air permukaan
			C2.4	Kenaikan tekanan pori dalam timbunan
	C3 AMD & <i>metal leaching</i>		C3.1	Salah klasifikasi PAF/NAF dan penempatan material
			C3.2	Terbentuknya air asam tambang
			C3.3	Masuknya oksigen berlebihan ke tubuh timbunan
	C4 Seismik & geoteknik fondasi		C4.1	Kegagalan lokal/penurunan diferensial pascagempa
			C4.2	Terjadinya pergeseran sepanjang sesar aktif
	C5 Instrumentasi pemantauan		C5.1	Sabotase terhadap peralatan dan instrumentasi
	C6 Kepatuhan & tata kelola		C6.1	Dokumentasi pemantauan dan pelaporan tidak lengkap

Pada ke-24 mode kegagalan ini dilakukan uji validitas menggunakan Korelasi Pearson dan uji reliabilitas menggunakan Cronbach's Alpha. Uji validitas digunakan untuk memastikan bahwa setiap butir pertanyaan dapat mengukur apa yang seharusnya diukur serta uji reliabilitas digunakan untuk

memastikan bahwa item pertanyaan mampu memberikan hasil yang konsisten. Hasil uji validitas menunjukkan bahwa sebagian besar item pada instrumen FMEA telah memenuhi kriteria, dengan rincian pada parameter occurrence terdapat 22 item valid dan 2 tidak valid, pada severity terdapat 21 item valid dan 3 tidak valid, serta pada detection terdapat 22 item valid dan 2 tidak valid. Penentuan validitas didasarkan pada nilai rhitung yang lebih besar dari rtabel (0,632) dan p-value < 0,05. Sebanyak 4 mode kegagalan dinyatakan tidak valid dan dikeluarkan dari analisis, yaitu A2.4, A2.5, C3.3, dan C6.1. Selanjutnya, uji reliabilitas yang dilakukan terhadap 20 mode kegagalan valid menunjukkan bahwa seluruh indikator memiliki nilai Cronbach's Alpha > 0,70, sehingga dinyatakan reliabel dan konsisten. Dengan demikian, 20 mode kegagalan tersebut dinilai layak untuk digunakan dalam analisis lanjutan.

Analisis FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)

Analisis FMEA pada penelitian ini dilakukan dengan menghitung nilai RPN (Risk Priority Number) pada setiap mode kegagalan untuk menetapkan prioritas risiko berdasarkan parameter occurrence, severity, dan detection yang diukur pada skala 1-5 pada kuesioner. Nilai RPN kemudian digunakan untuk menentukan peringkat prioritas risiko dari item mode kegagalan sehingga fokus mitigasi diarahkan pada risiko yang paling kritis. Level risiko mode kegagalan pada penelitian ini dibagi menjadi 3 level, yaitu tinggi, sedang, dan rendah. Level risiko tinggi memiliki RPN > 30, level sedang memiliki RPN antara 20 sampai 30, dan level rendah memiliki nilai RPN < 20. Tabel di bawah ini hasil RPN pada 20 item mode kegagalan berdasarkan kuesioner pada 10 responden yang telah dipilih.

Berdasarkan nilai RPN berdasarkan perkalian occurrence, severity, dan detection, didapatkan jumlah masing-masing level risiko seperti yang tercantum pada tabel 2.

Tabel 2. Jumlah mode kegagalan untuk setiap level risiko

RPN	Level Risiko	Jumlah
RPN < 20	Rendah	5
20 ≤ RPN ≤ 30	Sedang	9
RPN > 30	Tinggi	6

Berdasarkan level risiko tersebut, didapatkan 6 prioritas mode kegagalan yang perlu menjadi fokus mitigasi dalam operasional fasilitas baru filtered tailings. Tabel 3 berikut menunjukkan mode kegagalan dengan level risiko tinggi yang menjadi prioritas untuk dilakukan mitigasi.

Tabel 3. Mode kegagalan dengan level risiko tinggi

Kode	Identifikasi Risiko / <i>Failure Mode</i>	RPN	Persentase (%)	Persentase Kumulatif (%)
C1.2	Kegagalan kestabilan lereng timbunan dan likuifaksi	44,99	21,19%	21,19%
C3.2	Terbentuknya air asam tambang	43,78	20,61%	41,80%
C2.1	Kapasitas sistem pengelak tidak memadai	32,34	15,23%	57,03%
C2.4	Kenaikan tekanan pori dalam timbunan	30,89	14,54%	71,57%
C1.3	Erosi pada permukaan atau lereng timbunan	30,24	14,24%	85,81%
C2.3	Air bawah tanah mengalami kontaminasi dari air permukaan	30,13	14,19%	100%

Agar analisis lebih sistematis, keenam mode kegagalan tersebut dikelompokkan ke dalam kluster risiko yang mencerminkan kesamaan mekanisme kegagalan. Pendekatan pengelompokan ini penting untuk menunjukkan bahwa risiko pada fasilitas filtered tailings memiliki karakter yang saling berkaitan dan tidak berdiri sendiri.

Dalam penelitian ini, mode kegagalan prioritas dikelompokkan ke dalam tiga kluster utama, yaitu kluster geoteknik, kluster hidrologi/drainase, dan kluster lingkungan/geokimia. Kluster geoteknik mencakup kegagalan kestabilan lereng timbunan dan likuifaksi, kenaikan tekanan pori dalam timbunan, serta erosi pada permukaan atau lereng timbunan. Ketiga mode kegagalan tersebut ditempatkan dalam satu kluster karena sama-sama berkaitan dengan integritas fisik timbunan, kestabilan lereng, dan respons mekanik material terhadap kondisi pembebanan maupun kejenuhan air.

Kluster hidrologi/drainase mencakup kapasitas sistem pengelak yang tidak memadai serta kontaminasi air bawah tanah oleh air permukaan. Kedua mode kegagalan ini berkaitan dengan kegagalan pengelolaan air pada fasilitas filtered tailings. Kluster lingkungan/geokimia mencakup mode kegagalan terbentuknya air asam tambang. Mode kegagalan ini ditempatkan sebagai kluster tersendiri karena memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan risiko geoteknik maupun hidrologi. Risiko ini bersifat strategis karena dampaknya tidak hanya terjadi selama fase operasi, tetapi juga dapat berlanjut dalam jangka panjang terhadap kualitas lingkungan sekitar fasilitas. Dengan demikian, analisis FTA dan penyusunan strategi mitigasi selanjutnya dapat difokuskan pada tiga domain utama tersebut agar hasil penelitian lebih terarah.

Analisis FTA (Fault Tree Analysis)

Berdasarkan hasil FMEA, ditemukan enam mode kegagalan prioritas dengan nilai RPN tertinggi yang mencerminkan area risiko paling kritis pada fasilitas filtered tailings. Keenam mode tersebut dikelompokkan menjadi tiga kluster utama: geoteknik, hidrologi, dan lingkungan/geokimia. Pola ini mengindikasikan bahwa risiko dominan tidak berdiri sendiri, melainkan saling terkait melalui mekanisme kegagalan yang memengaruhi kestabilan fisik timbunan, pengelolaan air, dan kualitas lingkungan. Oleh karena itu, analisis lanjutan menggunakan Fault Tree Analysis (FTA) sebaiknya difokuskan pada satu kejadian puncak yang dapat merepresentasikan keterkaitan antar risiko prioritas secara menyeluruh.

Top event dalam penelitian ini ditetapkan sebagai “Kegagalan kinerja fasilitas filtered tailings dalam kondisi operasi”. Perumusan ini dipilih karena mampu mencakup seluruh mode kegagalan prioritas yang telah diidentifikasi pada tahap FMEA. Penggunaan top event ini diharapkan dapat menjadi dasar yang kuat dalam mengidentifikasi intermediate event dan basic event, sekaligus mendukung perumusan strategi mitigasi yang lebih terarah pada fungsi-fungsi kritis fasilitas filtered tailings.

Top event dalam penelitian ini diturunkan ke dalam beberapa intermediate event yang merepresentasikan kelompok penyebab utama kegagalan pada fasilitas filtered tailings. Intermediate event ini disusun untuk menggambarkan mekanisme kegagalan pada tingkat sistem yang secara langsung berkontribusi terhadap terjadinya kegagalan kinerja fasilitas dalam kondisi operasi.

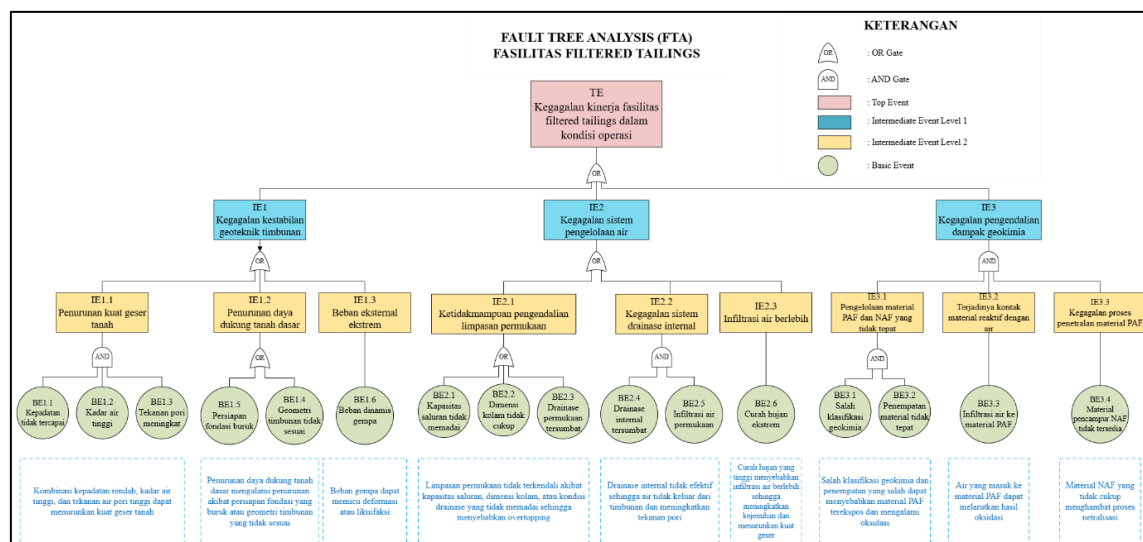
Dalam penelitian ini, intermediate event dikelompokkan menjadi tiga bagian utama, yaitu kegagalan kestabilan geoteknik timbunan, kegagalan sistem pengelolaan air dan drainase, serta kegagalan pengendalian dampak lingkungan dan proses geokimia. Ketiga kelompok ini ditetapkan

berdasarkan kesamaan karakteristik mekanisme kegagalan dari mode kegagalan prioritas yang telah diidentifikasi sebelumnya melalui FMEA.

Dalam penelitian ini, basic event merepresentasikan faktor-faktor teknis, operasional, maupun lingkungan yang secara langsung berkontribusi terhadap munculnya intermediate event. Dari analisis basic event-lah akar penyebab kegagalan dapat dikenali secara lebih spesifik dan dijadikan dasar dalam merumuskan tindakan mitigasi yang tepat.

Diagram FTA pada penelitian ini (lihat gambar 2) menggambarkan struktur hubungan sebab-akibat yang menjelaskan bagaimana berbagai kegagalan pada fasilitas filtered tailings dapat memicu terjadinya Top Event (TE). Diagram disusun menggunakan kombinasi logika OR and AND. Gerbang OR menunjukkan bahwa kegagalan pada salah satu sub-sistem sudah cukup menyebabkan Top Event, sedangkan gerbang AND digunakan pada kondisi tertentu ketika beberapa penyebab harus terjadi bersamaan.

Berdasarkan struktur Fault Tree Analysis yang telah disusun, diketahui bahwa top event dalam penelitian ini adalah kegagalan kinerja fasilitas filtered tailings dalam kondisi operasi. Kejadian puncak tersebut merupakan representasi kondisi ketika fasilitas tidak lagi mampu menjalankan fungsi utamanya sesuai desain dan kriteria operasional. Dari hasil pemetaan logika kegagalan, top event terbentuk melalui tiga kelompok Intermediate Event (IE), yaitu kegagalan geoteknik dan kestabilan timbunan, kegagalan hidrologi/drainase fasilitas, serta kegagalan pengendalian lingkungan dan geokimia.



Gambar 2. Diagram Struktur FTA Fasilitas Filtered Tailings

Pada IE1 (kegagalan geoteknik dan kestabilan timbunan), analisis menunjukkan bahwa jalur penyebab utama berasal dari kepadatan lapisan tidak tercapai, kandungan air material tinggi, peningkatan tekanan pori, ketidaksesuaian geometri lereng, kondisi fondasi lemah, atau pengaruh gempa. Faktor-faktor tersebut berkontribusi langsung terhadap penurunan faktor keamanan lereng dan meningkatnya potensi deformasi massa timbunan. Temuan ini menegaskan bahwa keberhasilan pengelolaan filtered tailings sangat dipengaruhi oleh kualitas konstruksi bertahap, efektivitas drainase internal, serta konsistensi penerapan parameter desain geoteknik. Meskipun tailing telah mengalami

proses dewatering, risiko geoteknik tetap menjadi isu dominan apabila kontrol terhadap kepadatan material, kadar air, dan geometri timbunan tidak dijaga secara ketat.

Pada IE2 (kegagalan hidrologi/drainase fasilitas), FTA memperlihatkan bahwa kapasitas saluran pengelak yang tidak memadai, penyumbatan saluran, infiltrasi air ke tubuh timbunan, serta migrasi rembesan tercemar merupakan jalur penyebab utama menuju kegagalan sistem. Hal ini menunjukkan bahwa air tetap menjadi elemen risiko penting pada fasilitas *filtered tailings*. Jika sistem drainase permukaan dan bawah permukaan tidak dikelola secara efektif, maka air hujan dapat meningkatkan kejenuhan lokal, memperbesar tekanan pori, memicu erosi, dan menyebabkan kontaminasi air tanah.

Pada IE3 (kegagalan pengendalian lingkungan dan geokimia), analisis menunjukkan bahwa salah klasifikasi material PAF/NAF, penempatan material reaktif yang tidak sesuai, serta kegagalan sistem penutup geokimia, dan ketidakcukupan material NAF merupakan akar penyebab utama pembentukan air asam tambang. Jalur ini menegaskan bahwa risiko lingkungan pada *filtered tailings* memiliki dampak jangka panjang. Penurunan kualitas air serta meningkatnya biaya remediasi lingkungan dapat saja terjadi setelah operasi. Dengan demikian, pengendalian geokimia harus dipandang sebagai bagian penting dari desain dan operasi fasilitas.

Analisis Penanganan Risiko (Risk Response) dan Perhitungan Risiko Residual

Analisis penanganan risiko dilakukan untuk menentukan strategi pengendalian yang paling tepat terhadap mode kegagalan prioritas pada fasilitas *filtered tailings* Tambang Emas PT. ABC. Tahap ini melanjutkan hasil dari analisis FMEA dan FTA. Mitigasi tidak hanya fokus pada mode kegagalan dengan RPN tertinggi, tetapi juga pada akar penyebab yang membentuk jalur kegagalan kritis dalam *fault tree*. Penanganan risiko diarahkan untuk memutus kombinasi *basic event* yang dapat memicu *top event*.

Strategi penyusunan mitigasi dalam penelitian ini dilakukan melalui *Focus Group Discussion* (FGD). Penanganan risiko disusun berdasarkan dua dasar utama: pertama, tingkat prioritas risiko berdasarkan hasil FMEA; kedua, hubungan sebab-akibat yang terlihat dari analisis FTA. Penanganan risiko kemudian diklasifikasikan ke dalam empat kategori respons, yaitu *risk avoidance*, *risk reduction*, *risk transfer*, dan *risk acceptance*, sebagaimana yang tercantum di tabel 4 berikut.

Tabel 4. Rencana mitigasi mode kegagalan prioritas

No	Kode	Failure Mode	BE Terkait	Strategi Risk Response	Rencana Mitigasi		
					Severity	occurrence	Detection
1	C1.2	Kegagalan kestabilan lereng timbunan dan likuifaksi	BE1.1, BE1.2, BE1.3, BE1.4, BE1.5, BE1.6	Risk avoidance dan risk reduction	Penetapan area terbatas/aman pada zona kritis	• Menghindari penerapan geometri lereng yang tidak sesuai dengan desain • Pengendalian kepadatan lapisan melalui <i>quality control</i> yang sistematis • Pembatasan kadar air material	• Monitoring deformasi • Monitoring kekuatan gempa untuk memvalidasi kondisi aktual • Inspeksi geoteknik berkala, serta instrumentasi untuk mendeteksi perubahan

						timbunan agar tidak melebihi batas optimum • Penggunaan <i>perforated horizontal drain</i> (PHD) sebagai drainase internal untuk menurunkan tekanan pori • Pengawasan ketat terhadap kemiringan lereng dan tinggi <i>lift</i> sesuai desain • Investigasi dan perbaikan kondisi tanah dasar • Penerapan desain pseudo-static untuk mengantisipasi pengaruh gempa	kondisi lereng secara dini
2	C3.2	Terbentuknya air asam tambang	BE3.1, BE3.2, BE3.3, BE3.4	<i>Risk avoidance</i> dan <i>risk reduction</i>	Penambahan <i>limestone</i> sebagai material penetral untuk mengurangi dampak apabila proses pembentukan asam telah mulai terjadi	• Pencegahan penempatan material reaktif dalam kondisi yang dapat memicu oksidasi sulfida • Penggunaan <i>Fleet Management System</i> (FMS) pada alat muat untuk meningkatkan akurasi klasifikasi material PAF dan NAF • Pembuatan desain enkapsulasi material PAF • Pengendalian infiltrasi air ke	• Verifikasi klasifikasi material • Pemantauan kondisi geokimia secara berkala pada area penimbunan

						zona material reaktif melalui sistem penutup dan pengelolaan air permukaan	
3	C2.1	Kapasitas sistem pengelak tidak memadai	BE2.1, BE2.2, BE2.3, BE2.6	<i>Risk reduction</i>	Penyediaan fasilitas penampungan tambahan untuk membatasi limpasan berlebih agar tidak langsung menyebar ke area sekitar	• Evaluasi ulang kapasitas saluran dan kolam pengendap berdasarkan hujan rencana ekstrem • Pelebaran atau penambahan fasilitas penampungan • Pemeliharaan rutin dan normalisasi saluran untuk mencegah sedimentasi • Pembaruan asumsi desain hidrologi sesuai data curah hujan aktual	• Inspeksi rutin saluran dan kolam • Evaluasi performa sistem hidrologi setelah kejadian hujan tinggi • Pemasangan <i>automatic rain gauge</i> dan elevasi air pada saluran pengelak
4	C2.4	Kenaikan tekanan pori dalam timbunan	BE1.2, BE1.3, BE2.4, BE2.5	<i>Risk reduction</i>	Penghentian sementara penimbunan pada area dengan tekanan pori tinggi untuk membatasi dampak terhadap kestabilan timbunan	• Membatasi kadar air material timbunan pada saat penempatan • Meningkatkan efektivitas drainase internal agar air tidak terjebak di dalam tubuh timbunan • Memastikan seluruh komponen drainase bawah permukaan bekerja sesuai desain • Mengendalikan	• Pemasangan piezometer • Penerapan <i>trigger level</i> tindakan sebagai bagian dari strategi deteksi dini

						urutan penempatan material agar tidak terkonsentrasi pada satu area	
5	C1.3	Erosi pada permukaan atau lereng timbunan	BE2.1, BE2.3, BE2.5, BE2.6	<i>Risk reduction</i>	• Konstruksi riprap • Konstruksi kolam pengendapan berukuran lebih besar • Rehabilitasi progresif untuk memperlambat erosi	• Peningkatan kapasitas saluran pengelak • Pembersihan saluran drainase secara berkala • Pembatasan infiltrasi limpasan ke tubuh timbunan • Pengecekan <i>grade</i> aktual secara rutin	• Inspeksi visual rutin pada lereng, terutama setelah hujan, untuk mendeteksi dini gejala penggerusan
6	C2.3	Air bawah tanah mengalami kontaminasi dari air permukaan	BE2.4, BE2.5	<i>Risk reduction dan risk transfer</i>	Pembuatan kolam lindi untuk membatasi penyebaran air tercemar sebelum mencapai media bawah permukaan	• Peningkatan kinerja drainase bawah permukaan • Pengendalian jalur infiltrasi • Konstruksi lapisan lempung dengan permeabilitas di bawah 10^{-7} cm/s pada fondasi • Pengecekan kualitas SPPL sebelum dilakukan penimbunan <i>co-disposal</i>	• Pemasangan sumur pantau kualitas air tanah • Verifikasi kualitas air • Audit lingkungan oleh pihak ketiga yang kompeten

Setelah strategi penanganan risiko dirumuskan pada masing-masing mode kegagalan prioritas, tahap selanjutnya adalah melakukan analisis residual risk. Analisis ini untuk menilai tingkat risiko yang masih tersisa setelah usulan mitigasi diterapkan. Dalam penelitian ini residual risk dihitung dengan menilai kembali parameter severity, occurrence, dan detection berdasarkan efektivitas mitigasi hasil Focus Group Discussion (FGD). Analisis ini penting untuk memastikan bahwa risiko setelah mitigasi turun ke tingkat yang dapat diterima sesuai standar keselamatan dan operasional perusahaan.

Dalam penelitian ini, evaluasi residual risk dilakukan terhadap enam mode kegagalan prioritas yang sebelumnya telah ditetapkan berdasarkan nilai RPN tertinggi. Secara umum, penurunan nilai risiko diharapkan terjadi terutama pada parameter occurrence dan detection. Hal ini disebabkan karena

strategi mitigasi yang dirumuskan lebih banyak diarahkan pada pengurangan kemungkinan terjadinya kegagalan melalui penguatan desain, pengendalian operasional, dan peningkatan monitoring.

Tabel 5. *Residual risk mode kegagalan prioritas*

No	Kode	Risiko Awal				Residual Risk				Penurunan (%)
		S	O	D	RPN Awal	S	O	D	RPN Residual	
1	C1.2	3,80	3,70	3,20	44,99	3,00	2,00	2,00	12,00	73,33%
2	C3.2	3,80	3,60	3,20	43,78	3,00	2,00	2,00	12,00	72,59%
3	C2.1	3,50	3,30	2,80	32,34	3,00	2,00	1,00	6,00	81,45%
4	C2.4	3,60	3,30	2,60	30,89	3,00	2,00	2,00	12,00	61,15%
5	C1.3	3,00	3,60	2,80	30,24	2,00	3,00	2,00	12,00	60,32%
6	C2.3	3,60	2,70	3,10	30,13	3,00	2,00	1,00	6,00	80,09%

Berdasarkan tabel 5, dapat dilihat bahwa seluruh mode kegagalan prioritas mengalami penurunan nilai RPN yang cukup signifikan setelah strategi mitigasi dirumuskan. Mitigasi yang dirumuskan dapat dinilai relevan terhadap akar penyebab yang telah diidentifikasi melalui FTA. Hasil evaluasi juga menunjukkan bahwa keenam mode kegagalan berhasil diturunkan ke kategori residual rendah. Beberapa risiko utama meskipun telah menurun, tetap membutuhkan pemantauan dan perbaikan berkesinambungan agar fasilitas dapat beroperasi secara aman, efisien, dan berkelanjutan.

Pembahasan

Hasil identifikasi menunjukkan bahwa risiko pada fasilitas filtered tailings tidak hanya berasal dari proses filtrasi, tetapi juga dari tahapan pengangkutan dan penimbunan. Temuan ini mengindikasikan bahwa keberhasilan implementasi filtered tailings bergantung pada keandalan seluruh rantai proses, bukan hanya pada kemampuan filter plant dalam menghasilkan kadar air yang sesuai spesifikasi. Kondisi tersebut sejalan dengan konsep integrated tailings management yang menyatakan bahwa risiko fasilitas tailing harus dievaluasi secara menyeluruh mulai dari proses dewatering hingga penempatan akhir material (Cacciuttolo & Atencio, 2023).

Jumlah mode kegagalan yang berhasil diidentifikasi pada penelitian ini relatif lebih banyak dibandingkan beberapa studi terdahulu yang umumnya hanya berfokus pada aspek geoteknik atau lingkungan. Penelitian oleh Grohs et al. (2024) menunjukkan bahwa fasilitas filtered tailings menghadapi risiko utama berupa pengendalian kadar air, stabilitas timbunan, dan pengelolaan limpasan permukaan. Hasil penelitian ini memperluas temuan tersebut dengan mengidentifikasi tambahan risiko pada sistem pengangkutan, drainase internal, instrumentasi, dan tata kelola operasional. Hal ini menunjukkan bahwa kompleksitas risiko filtered tailings pada tambang emas tropis memiliki karakteristik yang lebih beragam dibandingkan fasilitas yang beroperasi pada wilayah beriklim kering.

Hasil analisis FMEA menunjukkan bahwa risiko dengan nilai RPN tertinggi didominasi oleh aspek geoteknik dan pengelolaan air, yaitu kegagalan kestabilan lereng timbunan, pembentukan air asam tambang, kapasitas sistem pengelak yang tidak memadai, kenaikan tekanan pori, erosi lereng, serta kontaminasi air bawah tanah. Dominasi risiko-risiko tersebut menunjukkan bahwa keberadaan air

masih menjadi faktor pengendali utama pada fasilitas filtered tailings meskipun kandungan air material telah dikurangi melalui proses filtrasi.

Temuan ini konsisten dengan penelitian (Burden & Wilson, 2023a) yang menyatakan bahwa keberhasilan operasi dry stack tailings sangat dipengaruhi oleh pengendalian kadar air, efektivitas sistem drainase, serta kemampuan fasilitas dalam mengelola curah hujan ekstrem. Penelitian oleh Grohs et al. (2024) juga menunjukkan bahwa peningkatan kadar air dapat menyebabkan penurunan kuat geser material dan meningkatkan potensi deformasi maupun kegagalan lereng. Dengan demikian, hasil penelitian ini mengkonfirmasi bahwa risiko geoteknik tetap menjadi isu dominan pada fasilitas filtered tailings meskipun teknologi ini dirancang untuk mengurangi risiko yang umumnya ditemukan pada tailings slurry konvensional.

Selain aspek geoteknik, terbentuknya air asam tambang (acid mine drainage) menempati peringkat risiko tertinggi kedua. Temuan ini menunjukkan bahwa risiko lingkungan memiliki tingkat kepentingan yang setara dengan risiko keselamatan dan operasional. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Kossoff et al. (2014) yang menegaskan bahwa pengelolaan material Potentially Acid Forming (PAF) dan Non-Acid Forming (NAF) merupakan faktor kritis dalam keberlanjutan fasilitas tailing modern. Kegagalan dalam pengelolaan geokimia dapat menimbulkan dampak lingkungan jangka panjang yang melampaui umur operasional fasilitas.

Dari perspektif FMEA, hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa nilai RPN yang tinggi terbentuk dari kombinasi tingkat keparahan dampak yang besar serta keterbatasan kemampuan deteksi dini terhadap potensi kegagalan. Kondisi tersebut mendukung pendapat Stamatis (2019) bahwa FMEA efektif digunakan sebagai alat prioritisasi risiko pada sistem kompleks karena mampu mengidentifikasi area yang membutuhkan perhatian mitigasi lebih awal sebelum terjadi kegagalan aktual.

Analisis FTA menunjukkan bahwa kegagalan fasilitas filtered tailings merupakan hasil interaksi berbagai faktor teknis yang saling berkaitan. Berbeda dengan hasil FMEA yang menampilkan prioritas risiko secara individual, FTA memperlihatkan bagaimana kombinasi beberapa basic event dapat membentuk jalur kegagalan menuju top event. Dengan demikian, pendekatan FTA memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme kegagalan sistem secara keseluruhan.

Pada klaster geoteknik, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tekanan pori, ketidaksesuaian geometri lereng, dan kualitas pemadatan merupakan faktor dominan yang berkontribusi terhadap ketidakstabilan timbunan. Perubahan kondisi hidrologi internal merupakan salah satu pemicu utama kegagalan fasilitas tailings, terutama pada wilayah dengan curah hujan tinggi. Oleh karena itu, efektivitas sistem drainase internal menjadi faktor kunci dalam menjaga stabilitas jangka panjang fasilitas filtered tailings. Pada klaster hidrologi, hasil penelitian mengindikasikan bahwa kegagalan pengelolaan limpasan permukaan dapat memicu berbagai dampak lanjutan, mulai dari erosi hingga kontaminasi lingkungan. Desain drainase dan pengelolaan air merupakan elemen paling kritis dalam operasional filtered tailings pada daerah tropis dengan intensitas hujan tinggi. Sementara itu, pada klaster lingkungan dan geokimia, pembentukan air asam tambang ditemukan sebagai konsekuensi dari kesalahan klasifikasi material dan kegagalan pengendalian oksidasi sulfida. Strategi segregasi material PAF dan NAF merupakan tindakan mitigasi yang efektif untuk mengurangi risiko pembentukan acid mine drainage pada fasilitas penyimpanan tailing. Temuan ini sejalan dengan penelitian Sako & Pabst (2023) yang menunjukkan bahwa filtered tailings memiliki risiko oksidasi yang lebih tinggi akibat derajat kejenuhan yang rendah, sehingga pengelolaan geokimia dan strategi co-disposal menjadi faktor penting dalam mengendalikan pembentukan air asam tambang pada fasilitas

filtered tailings. Secara keseluruhan, hasil FTA memperlihatkan bahwa risiko pada fasilitas filtered tailings bersifat multidisiplin dan tidak dapat dikendalikan hanya melalui satu pendekatan teknis. Pengelolaan risiko yang efektif memerlukan integrasi aspek geoteknik, hidrologi, geokimia, dan tata kelola operasional secara simultan.

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa implementasi tindakan mitigasi mampu menurunkan nilai RPN rata-rata sebesar 71% sehingga seluruh risiko prioritas berada pada tingkat yang dapat diterima. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa strategi mitigasi yang disusun telah berhasil meningkatkan kemampuan deteksi, menurunkan peluang terjadinya kegagalan, serta mengurangi dampak potensial dari setiap mode kegagalan. Temuan ini mendukung penelitian Fernández-Iglesias et al. (2015) yang menyatakan bahwa efektivitas FMEA tidak hanya terletak pada kemampuan mengidentifikasi risiko, tetapi juga pada kemampuannya dalam mengevaluasi efektivitas tindakan pengendalian melalui perubahan nilai RPN. Penurunan nilai RPN setelah implementasi mitigasi dapat digunakan sebagai indikator kuantitatif keberhasilan program manajemen risiko.

Dari perspektif praktis, hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi penguatan desain geoteknik, peningkatan sistem drainase, pengendalian geokimia, dan pemantauan berbasis instrumentasi merupakan strategi yang paling efektif dalam mengurangi risiko fasilitas filtered tailings. Temuan ini memperkuat pandangan bahwa pengelolaan tailing modern harus mengintegrasikan pengendalian teknis dan sistem tata kelola risiko untuk memastikan keberlanjutan operasi jangka panjang.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menghasilkan daftar prioritas risiko, tetapi juga memberikan bukti empiris bahwa penerapan mitigasi yang terstruktur mampu meningkatkan tingkat keamanan dan keandalan fasilitas filtered tailings secara signifikan.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi 24 mode kegagalan potensial pada fasilitas filtered tailings yang mencakup tahapan filtrasi, pengangkutan, dan penimbunan tailing. Setelah dilakukan uji validitas dan reliabilitas, sebanyak 20 mode kegagalan dinyatakan valid dan reliabel untuk dianalisis lebih lanjut menggunakan metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). Hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat 6 mode kegagalan dengan nilai Risk Priority Number (RPN) tinggi yang menjadi prioritas utama untuk dilakukan mitigasi. Analisis Fault Tree Analysis (FTA) menunjukkan bahwa risiko-risiko tersebut saling berkaitan melalui tiga kelompok penyebab utama, yaitu kegagalan kestabilan geoteknik, kegagalan sistem pengelolaan air dan drainase, serta kegagalan pengendalian dampak lingkungan dan proses geokimia. Implementasi tindakan mitigasi yang diusulkan mampu menurunkan nilai RPN rata-rata sebesar 71%, sehingga seluruh risiko prioritas berada pada tingkat risiko yang dapat diterima. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi pendekatan FMEA dan FTA efektif digunakan untuk mengidentifikasi, memprioritaskan, dan mengendalikan risiko pada fasilitas filtered tailings sejak tahap perencanaan.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, penilaian risiko dilakukan pada tahap pra-konstruksi sehingga sebagian besar parameter penilaian masih didasarkan pada data desain, kajian teknis, serta penilaian para ahli dan belum didukung oleh data operasional aktual dari fasilitas filtered tailings yang telah beroperasi. Kedua, nilai severity, occurrence, dan detection diperoleh melalui pendekatan expert judgment sehingga masih mengandung unsur subjektivitas meskipun telah melalui

proses validasi dan diskusi kelompok terarah. Ketiga, penelitian ini menggunakan pendekatan FMEA yang bersifat semi-kuantitatif sehingga belum menggambarkan probabilitas kegagalan secara numerik maupun konsekuensi ekonomi secara rinci. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan analisis risiko menggunakan data operasional aktual setelah fasilitas filtered tailings beroperasi sehingga tingkat akurasi penilaian dapat ditingkatkan. Selain itu, integrasi FMEA dengan metode kuantitatif seperti Monte Carlo Simulation atau Quantitative Risk Assessment (QRA) dapat dilakukan untuk memperoleh estimasi probabilitas kegagalan yang lebih representatif. Penelitian lanjutan juga dapat mengevaluasi kinerja mitigasi secara periodik berdasarkan data pemantauan geoteknik, hidrologi, dan geokimia sehingga model manajemen risiko fasilitas filtered tailings dapat terus diperbarui secara dinamis sepanjang siklus hidup fasilitas.

REFERENSI

- Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*, 253(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>
- Azapagic, A. (2004). Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. *Journal of Cleaner Production*, 12(6), 639–662. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(03\)00075-1](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(03)00075-1)
- Burden, R., & Wilson, G. (2023a). Evaluating the dry stacking performance of commingled waste rock and filtered tailings. In *Proceedings of the 25th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings (Paste 2023)* (pp. 686–692). Australian Centre for Geomechanics. https://doi.org/10.36487/acg_repo/2355_53
- Burden, R., & Wilson, G. W. (2023b). Commingling of waste rock and tailings to improve "dry stack" performance: Design and evaluation of mixtures. *Minerals*, 13(2), Article 295. <https://doi.org/10.3390/min13020295>
- Cacciuttolo, C., & Atencio, E. (2023). Dry stacking of filtered tailings for large-scale production rates over 100,000 metric tons per day: Envisioning the sustainable future of mine tailings storage facilities. *Minerals*, 13(11), Article 1445. <https://doi.org/10.3390/min13111445>
- Cacciuttolo, C., Atencio, E., Komarizadehasl, S., & Lozano-Galant, J. A. (2026). Design of dry stacking of filtered tailings in extreme seismic and mountain conditions. *Applied Sciences*, 16(8), Article 3911. <https://doi.org/10.3390/app16083911>
- dos Santos, R. N. C., Caldeira, L. M. M. S., & Serra, J. P. B. (2012). FMEA of a tailings dam. *Georisk*, 6(2), 89–104. <https://doi.org/10.1080/17499518.2011.615751>
- Fernández-Iglesias, A., Correa de Araujo, A., Morton, O., Laine, J., Luiña Fernandez, R., & Martinez, G. (2015). Risk assessment methodology for paste and thickened tailings. In *Proceedings of the 18th International Seminar on Paste and Thickened Tailings* (pp. 167–180). Australian Centre for Geomechanics. https://doi.org/10.36487/acg_rep/1504_11_fernandez-iglesias
- Franks, D. M., Stringer, M., Torres-Cruz, L. A., Baker, E., Valenta, R., Thygesen, K., Matthews, A., Howchin, J., & Barrie, S. (2021). Tailings facility disclosures reveal stability risks. *Scientific Reports*, 11(1), Article 5353. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84897-0>
- Grohs, K., Liu, M., Satriawan, A., Kunadi, S., & Simanjuntak, B. (2024). Application of wet tailings pressure filtration for filtered tailings stack and co-disposal with mine waste at various sites

- including upstream and downstream of the tailings storage facility. In *Proceedings of the 27th International Seminar on Paste and Thickened Tailings* (pp. 77–94). Australian Centre for Geomechanics. https://doi.org/10.36487/acg_repo/2455_05
- Hao, M., & Nie, Y. (2022). Hazard identification, risk assessment and management of industrial system: Process safety in mining industry. *Safety Science*, 154, Article 105863. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105863>
- Hussey, I., Alsalti, T., Bosco, F., Elson, M., & Arslan, R. (2025). An aberrant abundance of Cronbach's alpha values at .70. *Advances in Methods and Practices in Psychological Science*, 8(1). <https://doi.org/10.1177/25152459241287123>
- Kossoff, D., Dubbin, W. E., Alfredsson, M., Edwards, S. J., Macklin, M. G., & Hudson-Edwards, K. A. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 51, 229–245. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>
- Lottermoser, B. G. (2010). *Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8>
- Lupo, J., & Hall, J. (2010). Dry stack tailings: Design considerations. In *Proceedings of the 14th International Conference on Tailings and Mine Waste* (pp. 327–334).
- Pavlovic, N., Petrovic, B., & Subaranovic, T. (2023). Evaluation methodology of open-pit mine overall slope failure risks. *Materials Proceedings*, 11, Article 15011. <https://doi.org/10.3390/materproc2023015011>
- Sako, C. H., & Pabst, T. (2023). Comparative geochemical evaluation of codisposal approaches for reactive filtered tailings deposition. *Cleaner Waste Systems*, 5, Article 100094. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100094>
- Schafer, H. L., Beier, N. A., & Macciotta, R. (2021). A failure modes and effects analysis framework for assessing geotechnical risks of tailings dam closure. *Minerals*, 11(11), Article 1234. <https://doi.org/10.3390/min11111234>
- Schafer, H. L., Beier, N. A., & Macciotta, R. (2022). Applying a generalized FMEA framework to an oil sands tailings dam closure plan in Alberta, Canada. *Minerals*, 12(3), Article 293. <https://doi.org/10.3390/min12030293>
- Stamatis, D. H. (2019). *Risk management using Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*. Quality Press.
- Tubis, A., Werbińska-Wojciechowska, S., & Wroblewski, A. (2020). Risk assessment methods in the mining industry: A systematic review. *Applied Sciences*, 10(15), Article 5172. <https://doi.org/10.3390/app10155172>