

Implementasi *Event Tree Analysis* dan metode *Andersen* untuk penilaian risiko Bendungan Titab

Dea Putri Arifah^{1,*}, Dyah Ari Wulandari¹, Hari Nugroho¹

¹Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Jawa Tengah, Indonesia

*Corresponding authors: deaputriarifah@students.undip.ac.id

Submitted: 28 October 2025, Revised: 5 December 2025, Accepted: 20 December 2025

ABSTRACT: Dam as water resources infrastructure has inherent failure risks, necessitating regular risk assessments to ensure its safety and functional sustainability. This study aims to evaluate the risk level of Titab Dam using two main methods: Event Tree Analysis (ETA) and the modified Andersen method. Hazard identification was conducted based on the 2024 inspection report, followed by failure mode analysis using FMECA (Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis) to determine mitigation priorities. ETA results revealed that both individual and group extreme probabilities exceeded tolerance limits, requiring special interventions for several primary components, especially at the dam crest. Meanwhile, the assessment using the Andersen method produced a safety score of 66.33, categorized as ADEQUATE and still requiring corrective measures for defects found during inspections. This research provides an integration of two methods (ETA and Andersen) to strengthen the validation of dam risk assessment in Indonesia, thereby making the safety evaluation results more comprehensive and reliable. This study emphasizes the importance of implementing risk assessments as part of major inspections and ongoing monitoring activities to minimize failure potential and improve dam safety.

KEYWORDS: Andersen method; Event Tree Analysis; FMECA; risk assessment; Titab Dam.

ABSTRAK: Bendungan sebagai infrastruktur sumber daya air memiliki risiko kegagalan, sehingga diperlukan penilaian risiko secara berkala untuk memastikan keselamatan dan keberlanjutan fungsinya. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat risiko pada Bendungan Titab menggunakan dua metode utama, yaitu *Event Tree Analysis* (ETA) dan metode modifikasi Andersen. Identifikasi bahaya dilakukan berdasarkan laporan inspeksi Tahun 2024, dilanjutkan dengan analisis model kegagalan menggunakan metode FMECA (*Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis*) untuk menentukan prioritas penanganan. Hasil analisis ETA menunjukkan nilai probabilitas ekstrim individu dan kelompok yang melebihi batas toleransi, sehingga penanganan khusus diperlukan pada beberapa komponen utama, terutama puncak bendungan. Sementara itu, penilaian dengan metode Andersen menghasilkan nilai keamanan sebesar 66.33, yang termasuk kategori CUKUP dan tetap membutuhkan upaya perbaikan terhadap kerusakan yang ditemukan selama inspeksi. Penelitian ini memberikan integrasi dua metode (ETA dan Andersen) untuk memperkuat validasi penilaian risiko bendungan di Indonesia, sehingga hasil evaluasi keamanan lebih komprehensif dan dapat diandalkan. Penelitian ini menegaskan pentingnya implementasi penilaian risiko sebagai bagian dari pelaksanaan inspeksi dan kegiatan pemantauan lainnya guna meminimalkan potensi kegagalan dan meningkatkan keselamatan bendungan.

KATA KUNCI: Metode Andersen; *Event Tree Analysis*; FMECA; penilaian risiko; Bendungan Titab.

© The Author(s) 2025. This article is distributed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International license.

1. PENDAHULUAN

Kegagalan bendungan dapat melepaskan volume air dalam jumlah besar secara tiba-tiba, memicu banjir bandang dengan daya hancur yang jauh lebih besar dibandingkan banjir akibat curah hujan (Costa, 1985). Bendungan sebagai infrastruktur sumber daya air memiliki nilai risiko yang besar, jika suatu bendungan mengalami kegagalan atau keruntuhan maka akan menimbulkan bencana dan membahayakan kelangsungan hidup manusia dan flora fauna di hilirnya. Kompleksitas risiko bendungan semakin meningkat akibat perubahan iklim dan variabilitas hidro-meteorologis yang mempengaruhi pola banjir dan debit aliran (Wang et al., 2023). Pasal 40 Undang-

Undang Republik Indonesia Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana menyebutkan bahwa “Setiap kegiatan pembangunan yang mempunyai risiko tinggi yang menimbulkan bencana dilengkapi dengan analisis risiko bencana sebagai bagian dari usaha penanggulangan bencana”. Kewajiban analisis risiko bencana secara rinci disebutkan dalam Pasal 12 Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 21 Tahun 2008 tentang Penyelenggaraan Penanggulangan Bencana.

Dalam Pedoman Teknis Penilaian Risiko Bendungan (Kementerian Pekerjaan Umum, 2011) mengamanatkan penilaian risiko bendungan paling tidak dilakukan setiap 10 (sepuluh) tahun sekali

bersamaan dengan kegiatan pemeriksaan besar bagi bendungan dengan tinggi di atas 75 m atau dengan volume tampungan sekurang-kurangnya 100 juta m³ serta untuk bendungan-bendungan dengan kelas bahaya tinggi. Namun untuk meningkatkan keamanan bendungan sekaligus melengkapi program inspeksi besar bendungan maka penilaian risiko dapat dilakukan 5 (lima) tahun sekali. Pada tahap perencanaan bendungan, diperlukan penilaian risiko untuk menetapkan kriteria desain dan penyempurnaannya agar potensi bahaya dapat diminimalkan secara efektif. Untuk bendungan yang sedang dalam proses konstruksi atau sudah beroperasi, penilaian risiko ditujukan untuk mengidentifikasi apakah tingkat risiko yang ada masih dapat diterima (Pamungkas et al., 2023). Dalam hal risiko dinilai tidak dapat ditoleransi, diperlukan strategi mitigasi dan tindakan pengurangan risiko.

Evaluasi keamanan bendungan telah berkembang pesat dengan berbagai pendekatan metode. Secara umum terdapat tiga jenis utama analisis penilaian risiko, yaitu kualitatif, semi-kualitatif, dan kuantitatif. Analisis kualitatif menggunakan deskripsi verbal atau skala peringkat sederhana untuk menggambarkan besarnya konsekuensi dan kemungkinan, sedangkan analisis semi-kualitatif menambahkan nilai numerik pada kategori kualitatif tanpa menuntut hubungan yang akurat antara besarnya konsekuensi dan/atau kemungkinan. Analisis kuantitatif memanfaatkan nilai numerik yang lebih rinci untuk mengestimasi probabilitas dan dampak secara lebih akurat (Fu et al., 2018). Pemilihan tipe analisis dan tingkat kedalamannya ditentukan oleh tujuan studi serta kebutuhan pemilik bendungan dalam melakukan penilaian risiko.

Studi terdahulu telah banyak menerapkan metode indeks risiko seperti metode Andersen dan *International Commission on Large Dams* (ICOLD). Indrawan et al., (2013) menerapkan modifikasi Andersen dan ICOLD pada 12 bendungan di Pulau Jawa untuk memprioritaskan rehabilitasi fisik. Serupa dengan itu Pramudawati et al., (2020) melakukan penilaian risiko pada bendungan-bendungan di Jawa Timur menggunakan pendekatan indeks untuk menentukan prioritas penanganan. Ismijayanti et al., (2023) juga melakukan penilaian risiko serupa pada Bendungan Manggar dengan hasil klasifikasi CUKUP (nilai 68.4), yang menunjukkan pola umum pada bendungan-bendungan di Indonesia.

Firmansyah & Sriyana, (2022) melakukan penilaian pada Bendungan Saguling dengan metode modifikasi ICOLD dan Andersen, sedangkan Riando et al., (2023) menganalisis Bendungan Wonorejo menggunakan kedua metode modifikasi tersebut. Di sisi lain, metode kuantitatif berbasis probabilitas seperti *Event Tree Analysis* (ETA) dinilai lebih akurat dalam memetakan jalur kegagalan logika (*failure path*). Herawanto et al., (2023) berhasil menggunakan

ETA untuk menghitung probabilitas keruntuhan Bendungan Nglangon, sementara itu Fernandes et al., (2022) menekankan bahwa ETA sangat efektif karena memanfaatkan data inspeksi visual untuk mengidentifikasi kondisi yang tidak wajar pada bendungan.

Mayoritas penelitian sebelumnya berfokus pada bendungan tua yang telah beroperasi puluhan tahun (Indrawan et al., 2013; Suprpto et al., 2021), masih sedikit studi yang mengkaji profil risiko pada bendungan yang relatif baru beroperasi. Apriana et al., (2025) menunjukkan bahwa bendungan-bendungan baru yang telah beroperasi beberapa tahun tetap perlu penilaian risiko periodik untuk mendeteksi anomali geoteknik yang berkembang seiring waktu. (Fadli et al., 2023) juga melaporkan bahwa indeks risiko pada bendungan-bendungan di Sragen berkisar 55-75 (CUKUP hingga KURANG MEMUASKAN), menunjukkan fenomena serupa.

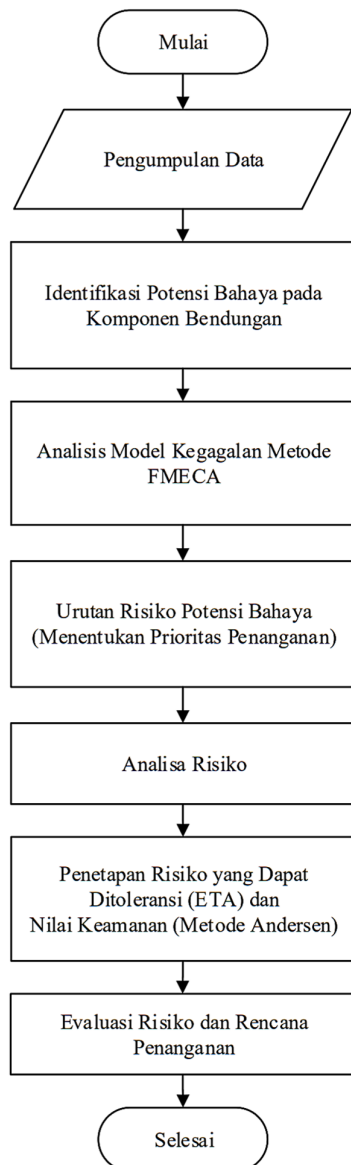
Bendungan Titab yang konstruksinya berlangsung pada Tahun 2011-2015 dan mulai beroperasi pada Tahun 2018 kini memasuki fase krusial pasca-konstruksi. Bendungan Titab merupakan bendungan urugan batu random inti tegak dengan tinggi bendungan utama 59.90 m dari dasar sungai, lebar puncak 12.00 m, panjang 210.00 m dan luas genangan waduk 68.83 Ha (PT. Indra Karya (Persero), 2022). Berdasarkan inspeksi tahun 2024, ditemukan beberapa isu fisik seperti retakan dan rembesan yang memerlukan evaluasi mendalam. Selain itu, sebagian besar studi hanya menggunakan satu pendekatan, padahal kombinasi kedua metode dapat memberikan hasil yang lebih terpercaya karena didukung oleh data kondisi fisik lapangan dan analisis mekanisme kegagalan secara bersamaan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat keamanan Bendungan Titab secara menyeluruh menggunakan dua metode sekaligus, yaitu metode *Event Tree Analysis* (ETA) untuk estimasi probabilitas kegagalan dan metode Modifikasi Andersen untuk penilaian kondisi fisik berbasis indeks. Analisis pohon kejadian/ETA merupakan teknik analisis yang mengidentifikasi hasil dari kemungkinan terjadinya suatu peristiwa pada suatu sistem akibat suatu kejadian awal (Herawanto et al., 2023). Sementara metode modifikasi Andersen membutuhkan proses pembobotan pada berbagai parameter analisis yang kemudian diurutkan sesuai peringkat prioritas tingkat risiko masing-masing. Parameter-parameter metode Andersen telah dikembangkan dan diadaptasi untuk kondisi bendungan di Indonesia (Pamungkas et al., 2023). Penelitian ini memberikan dua kontribusi, yaitu panduan prioritas penanganan berdasarkan data inspeksi terbaru (2024), serta kontribusi metodologis dalam menunjukkan efektivitas kombinasi metode FMECA, ETA, dan Andersen untuk memvalidasi

status keamanan pada bendungan urugan batu yang baru beroperasi.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang didapatkan dari Laporan Akhir Pelaksanaan Konstruksi Bendungan Titab (2011-2021) dan Laporan Inspeksi Persiapan Izin Operasi Bendungan Titab (2024). Data yang digunakan untuk analisis merupakan data teknis bendungan dan data hasil pengamatan visual inspeksi yang telah dilakukan sebagaimana tercantum dalam laporan. Secara umum langkah penilaian risiko pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Bagan alir penilaian risiko

2.1 Lokasi Penelitian

Bendungan Titab berlokasi di Tukad Saba, secara geografis Bendungan Titab terletak pada koordinat $08^{\circ} 14' 41.30''$ Lintang Selatan (LS) dan $114^{\circ} 56' 31.36''$ Bujur Timur (BT). Secara administratif terletak di 4 desa yaitu Desa Telaga, Desa Ularan, Desa Busungbiu Kecamatan Busungbiu dan Desa Ringdikit Kecamatan Seririt, Kabupaten Buleleng, Provinsi Bali.

2.2 Identifikasi Potensi Bahaya

Identifikasi Potensi bahaya dilakukan melalui tiga tahapan sistematis (Kementerian Pekerjaan Umum, 2011), yaitu :

1. Penyusunan daftar seluruh potensi bahaya yang mungkin terjadi pada bendungan.
2. Proses identifikasi, yaitu bahaya-bahaya yang memiliki tingkat risiko sangat rendah atau dapat diabaikan dikeluarkan dari daftar analisis lanjutan berdasarkan kriteria toleransi risiko yang telah ditetapkan.
3. Penyusunan daftar final yang memuat bahaya-bahaya signifikan yang memerlukan analisis lebih mendalam untuk menentukan besaran risiko dan tingkat kekritisan terhadap keamanan bendungan.

2.3 Identifikasi Model Kegagalan

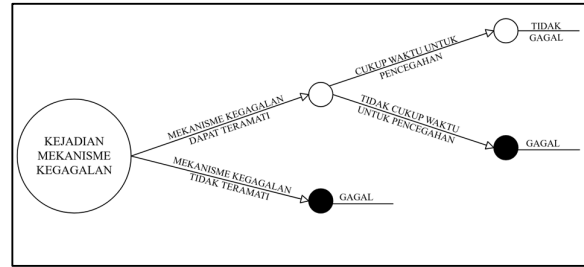
Identifikasi model kegagalan dilakukan dengan teknik kualitatif, yaitu memetakan komponen bendungan dan analisis skenario bahaya menggunakan metode *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* (FMECA), yaitu pengembangan dari metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) dengan penambahan penilaian tingkat keparahan dampak kegagalan (Rahman & Fahma, 2021). Pengembangan lebih lanjut dari FMECA untuk risiko geoteknik dapat dilihat pada pendekatan yang diusulkan Schafer et al., (2021). Besaran risiko (R) atau *hazard* ditentukan dari kombinasi dua parameter, yaitu kemungkinan/ *likelihood* terjadinya bahaya (P) dan konsekuensi/ *consequence* (I). Sedangkan nilai kualitatif keyakinan/ *confidence* (C) diperlukan untuk menentukan besarnya kekritisan/ *critically* (Cr) suatu bahaya.

2.4 Metode Analisa Risiko

2.4.1 Metode *Event Tree Analysis* (ETA)

Mekanisme kegagalan bendungan diuraikan melalui elemen-elemennya menggunakan pendekatan logika salah satunya dengan pohon kejadian (*event tree*) yang dapat dilihat pada Gambar 2. Pengembangan pohon kejadian akan mempermudah pengenalan mekanisme kegagalan secara logika dan meningkatkan pemahaman terhadap mekanisme kegagalan, dengan demikian proses kegagalan dapat diuraikan dalam elemen-elemennya sehingga probabilitas untuk setiap jalur kegagalan dapat diperkirakan. Penetapan probabilitas tahunan dilakukan menggunakan “*verbal descriptors*” yang

telah ditentukan seperti pada Tabel 1, dengan demikian dapat dilakukan analisis probabilitas konsekuensi terhadap setiap potensi bahaya dengan metode *Event Tree Analysis* (ETA). Dalam metode *Event Tree Analysis*, nilai probabilitas akhir dihitung berdasarkan probabilitas pada tahapan sebelumnya dan akan dikategorikan menjadi beberapa tingkat antara lain: E (sangat tinggi); H (tinggi); M (sedang); L (rendah); dan N (sangat rendah).



Gambar 2 Diagram mekanisme kegagalan dan tindakan pencegahan pada *Event Tree Analysis* (Kementerian Pekerjaan Umum, 2011)

Tabel 1. Skema pemetaan probabilitas

Deskripsi Keadaan atau Kejadian	Urutan Penetapan Besaran Probabilitas
Kejadian pasti terjadi	1
Kejadian atau peristiwa teramati dalam database	0,1
Kejadian atau peristiwa tidak teramati, atau teramati 0,01 pada satu kejadian kecil dalam data base g ada beberapa potensi skenario kegagalan dapat diidentifikasi	0,01
Kejadian atau peristiwa tidak teramati dalam database yang ada. Sulit untuk diidentifikasi mengenai adanya skenario kegagalan yang masuk akal, namun satu skenario dapat diidentifikasi setelah dilakukan usaha yang cukup	0,001
Kejadian atau peristiwa belum pernah teramati dan tidak ada skenario yang masuk akal dapat diidentifikasi, meskipun setelah dilakukan usaha yang cukup	0,0001

Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum, 2011

2.4.2 Metode Andersen

Metode modifikasi Andersen dikategorikan sebagai metode indeks risiko yang menghasilkan indikator tunggal untuk menilai tingkat potensi risiko akibat keruntuhan bendungan urugan. Metode ini pertama kali dikembangkan oleh Andersen et al., (1999) sebagai *tool* untuk memprioritaskan tugas pemeliharaan pada bendungan urugan (*embankment dams*). Perhitungan risiko dilakukan dengan menghitung defisiensi pada kondisi fisik aktual bendungan dan membandingkannya dengan kondisi idealnya berdasarkan pembobotan tingkat kepentingan terhadap aspek keamanan bendungan, tingkat kerentanan struktur dan potensi bahaya (Andersen et al., 2001).

Penilaian dimulai dengan menetapkan tingkat kepentingan bendungan berdasarkan parameter kerentanan dan potensi bahaya, kemudian dilakukan evaluasi visual terhadap kondisi fisik bendungan untuk menghitung probabilitas kegagalan menggunakan Analisis Bayesian, dimana format inspeksi digunakan sebagai panduan penilaian indikator kondisi fisik di lapangan. Tingkat kepentingan dan hasil penilaian kondisi fisik selanjutnya digabungkan untuk menghasilkan indeks risiko secara menyeluruh, dengan prioritas diberikan pada defisiensi fisik tersebut (Indrawan et al., 2013).

Pada metode Andersen, faktor kerawanan total dihitung dengan persamaan berikut:

$$V = \frac{(I_1 + I_2 + I_3 + I_4)}{2} \times \frac{(E_1 + E_2)}{2} \times \frac{(D_1 + D_2)}{2} \quad (1)$$

$$I_{dam} = V \times H \quad (2)$$

dimana V adalah faktor kerawanan total; I_1, I_2, I_3, I_4 adalah bobot faktor intrinsik pengaruh tinggi, tipe, fondasi, dan kapasitas waduk bendungan; E_1, E_2 adalah bobot faktor eksternal yaitu umur dan kegempaan; D_1, D_2 adalah bobot faktor kecukupan kapasitas pelimpah dan stabilitas; I_{dam} adalah faktor tingkat kepentingan awal (faktor penentu utama); H adalah faktor potensi bencana.

Faktor kepentingan relatif bendungan diperoleh dari persamaan berikut:

$$RI_j = P [M_i/F] \times P [C_j/M_i] \times I_{dam} \quad (3)$$

dimana RI_j adalah indeks kepentingan relatif; $P [M_i/F]$ adalah probabilitas kondisi fisik yang merupakan faktor-faktor penyebab kegagalan; $P [C_j/M_i]$ adalah probabilitas kegagalan kondisi permulaan; I_{dam} adalah Indeks faktor penentu utama.

Suatu inspeksi keamanan bendungan perlu dilakukan untuk menentukan kondisi sebenarnya di lapangan. Sebanyak sembilan kondisi fisik di lapangan harus diidentifikasi dengan memberi bobot sesuai dengan daftar isian yaitu:

1. Penghalang pada saluran pelimpah (CF1);
2. Pengurangan tinggi jagaan (CF2);
3. Penghalang pada saluran pengeluaran (CF3);
4. Erosi pada saluran pelimpah (CF4);
5. Material pelindung pada permukaan bendungan (CF5);
6. Erosi buluh pada tubuh bendungan (CF6);
7. Erosi buluh pada fondasi bendungan (CF7);
8. Stabilitas tubuh bendungan (CF8);
9. Stabilitas tubuh dan fondasi bendungan (CF9).

Indeks risiko total (IR_{tot}) menjadi faktor yang menggambarkan risiko bendungan dengan mengkombinasikan nilai bobot kondisi lapangan (CF_j) dengan faktor kepentingan relatif menggunakan persamaan berikut:

$$IR_j = RI_j \times (10 - CF_j) / 10 \quad (4)$$

$$IR_{tot} = \sum IR_j \quad (5)$$

dimana CF_j adalah bobot kondisi lapangan ke j.

Perhitungan nilai keamanan bendungan adalah sebagai berikut (Andersen et al., 2001):

$$N_{aman} = (I_{dam} - IR_{tot}) / I_{dam} \times 10 \quad (6)$$

dimana adalah N_{aman} nilai keamanan bendungan; I_{dam} adalah faktor kepentingan awal; IR_{tot} adalah indeks risiko total

Setelah mendapatkan nilai keamanan bendungan, maka tingkat keamanan bendungan dapat ditentukan berdasarkan klasifikasi pada Tabel 2.

Tabel 2 . Klasifikasi kondisi keamanan bendungan berdasarkan Indeks Risiko

Nilai Keamanan (N_{aman})	Klasifikasi
>75	Memuaskan
65-75	Cukup
55-64	Kurang Memuaskan
<55	Tidak Memuaskan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Identifikasi Potensi Bahaya

Identifikasi bahaya dilakukan berdasarkan Laporan Inspeksi Persiapan Izin Operasi Bendungan Titab yang dilaksanakan pada Tahun 2024. Terdapat 5 komponen bendungan yang diidentifikasi, yaitu: (1) puncak bendungan; (2) lereng hulu dan hilir; (3) bangunan pelimpah; (4) bangunan *intake*; (5) *toe drain* dan hilir kaki bendungan. Kelima komponen tersebut diberikan kondisi beban yang berbeda-beda tergantung risiko yang akan dihadapi pada kondisi-kondisi tersebut. Hasil identifikasi potensi bahaya dapat dilihat pada Tabel 3.

3.2 Analisis Model Kegagalan dan Akibatnya

Hasil identifikasi potensi bahaya kemudian dianalisis dengan metode FMECA, yaitu dengan menghitung nilai kualitatif kekritisitas bahaya (Cr) dan nilai risiko (R) berdasarkan nilai kemungkinan (P), konsekuensi (I), keyakinan (C). Analisis ini mengikuti metode yang telah teruji pada berbagai bendungan di Indonesia dan internasional (Adamo et al., 2017). Hasil analisis metode FMECA dapat dilihat pada Tabel 4 menunjukkan variasi tingkat risiko dan kekritisitas pada berbagai komponen bendungan. Selanjutnya pada Tabel 5 dilakukan analisis untuk menentukan prioritas penanganan terhadap potensi risiko yang sudah diidentifikasi.

Tabel 3. Identifikasi Potensi Bahaya Bendungan Titab

No	Komponen	Kondisi Beban	Identifikasi Sumber Bahaya	Penyebab	Mode Kegagalan	Keterangan
1	Puncak Bendungan	Normal	Retak memanjang pada puncak bendungan	Terjadinya sisa konsolidasi pada material timbunan inti di puncak bendungan	Air dapat masuk ke dalam material zona inti sehingga merusak struktur dan retakan dapat membahayakan orang yang melintas di atasnya	Retakan memanjang pada puncak bendungan dapat dilihat secara visual.
2	Lereng Hulu dan Hilir Bendungan	Normal	Undulasi (tampak naik turun)	Deformasi pada tubuh bendungan	Terganggunya stabilitas pada tubuh bendungan	Undulasi pada <i>riprap</i> lereng hulu dan hilir dapat dilihat secara visual.
3	Bangunan Pelimpah	Banjir	Kemungkinan terjadinya pergeseran pada dinding apron dan dinding beton penahan bangunan pelimpah	Material timbunan menjadi jenuh terkena air saat hujan dan banyaknya mata air yang ditemukan setelahnya	Terganggunya stabilitas pada bangunan pelimpah dan risiko keruntuhan	Pernah terjadi keruntuhan pada dinding <i>stilling basin spillway</i> setelah terjadi <i>spill out</i> pada 18 Februari 2018.
4	Bangunan Intake	Banjir	Kemungkinan kondukt tidak mampu menampung air yang mengalir saat kondisi banjir	Terjadinya semburan liar (<i>blow out</i>) pada menara <i>intake</i> terbenam (<i>submerged intake tower</i>)	Runtuhnya dinding pembatas antara kondukt sebelah kanan dan kondukt sebelah kiri	Pernah terjadi keruntuhan dinding pembatas antara kondukt kanan dan kondukt kiri pada tahun 2015 saat kondisi banjir karena adanya semburan liar dari <i>intake</i> terbenam
5	<i>Toe Drain</i> dan hilir kaki bendungan	Normal	Terjadi rembesan yang cukup besar	Adanya lapisan akuifer yang tertekan namun tidak terhubung dengan waduk	Terganggunya stabilitas bendungan dapat menyebabkan longsoran pada hilir bendungan	Rembesan yang terjadi cukup besar dan terlihat secara visual

Tabel 4. Perkiraan risiko dengan metode FMECA

No	Bagian/ Komponen	Kondisi Beban	Kemungkinan (P)	Konsekuensi (I)	Keyakinan (C)	Risiko (R)=(P)X(I)	Kekritisian (Cr)=(R)X(C)
1	Puncak Bendungan	Normal	3	4	2	12	24
2	Lereng Hulu dan Hilir Bendungan	Normal	2	2	2	4	8
3	Bangunan Pelimpah	Banjir	1	4	2	4	8
4	Bangunan Intake	Banjir	2	4	2	8	16
5	Toe Drain dan hilir kaki bendungan	Normal	2	2	3	4	12

Tabel 5. Urutan risiko dan potensi bahaya

No. Risiko	Komponen	Kondisi Beban	Bahaya (Hazard)	Risiko		Kekritisian	Urutan		Tindakan
				Nilai	Diskripsi	Nilai	Risiko	Kekritisian	
1	Puncak Bendungan	Normal	Retak memanjang pada puncak bendungan	12	Sedang	24	1	1	Dianalisa
2	Lereng Hulu dan Hilir Bendungan	Normal	Undulasi (tampak naik turun)	4	Sangat Rendah	8	3	4	Tidak Dianalisa
3	Bangunan Pelimpah	Banjir	Kemungkinan terjadinya pergeseran pada dinding apron dan dinding beton penahan bangunan pelimpah	4	Sangat Rendah	8	3	4	Tidak Dianalisa
4	Bangunan <i>Intake</i>	Banjir	Kemungkinan conduit tidak mampu menampung air yang mengalir saat kondisi banjir	8	Rendah	16	2	2	Dianalisa
5	<i>Toe Drain</i> dan hilir kaki bendungan	Normal	Terjadi rembesan yang cukup besar	4	Sangat Rendah	12	3	3	Dianalisa

3.3 Analisis Probabilitas Tahunan

3.3.1 Metode *Event Tree Analysis* (ETA)

Setelah sebelumnya didapatkan urutan risiko potensi bahaya pada metode FMECA, selanjutnya dilakukan perkiraan probabilitas kejadian tahunannya menggunakan metode *Event Tree Analysis* (ETA). Nilai probabilitas ekstrim individu sebesar 1,27E-01 melebihi ambang batas toleransi individu 1,00E-04, sehingga dibutuhkan penanganan segera, terutama terhadap masalah retakan memanjang pada puncak

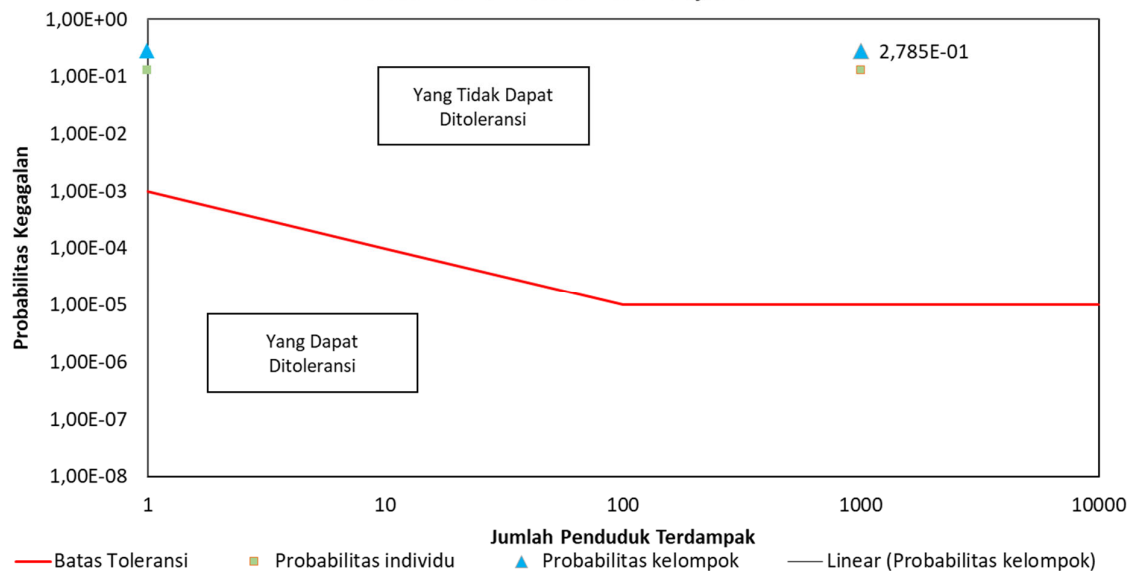
Bendungan Titab yang berpotensi membahayakan pengguna di area tersebut. Sementara itu, probabilitas ekstrim kelompok sebesar 2,78E-01 juga melampaui batas toleransi kelompok yang sama, sehingga tindakan penanganan mendesak perlu dilakukan khususnya pada tiga komponen utama yang menjadi prioritas mitigasi. Ringkasan probabilitas konsekuensi masing-masing mode kegagalan yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 6, sedangkan hasil evaluasi dengan *Event Tree Analysis* dapat dilihat pada Tabel 7 dan **Gambar 3**.

Tabel 6. Probabilitas bahaya bendungan titab metode ETA

No	Kasus/ Kondisi	Kasus/ Identifikasi Bahaya	E	H	M	L	N	Total
1	Puncak Bendungan (Pembebanan Gempa)	Retak memanjang pada puncak bendungan	1.27.E-01	0.00.E+00	1.54.E-02	0.00.E+00	8.57.E-01	1.00.E+00
2	Bangunan Intake (Pembebanan Banjir)	Kemungkinan conduit tidak mampu menampung air yang mengalir saat kondisi banjir	7.13.E-02	4.21.E-02	0.00.E+00	0.00.E+00	8.87.E-01	1.00.E+00
3	Toe Drain dan hilir kaki bendungan (Pembebanan Gempa)	Terjadi rembesan yang cukup besar	7.98.E-02	3.11.E-02	0.00.E+00	0.00.E+00	8.89.E-01	1.00.E+00
	Total		2.78.E-01	7.3.E-02	1.5.E-02	0.0.E+00	2.6.E+00	3.0.E+00

Tabel 7. Status probabilitas metode ETA Bendungan Titab

Kriteria	Hasil analisis	Batas	Status
Probabilitas ekstrim individu diambil dari per bagian	1.27E-01	1.00.E-04	Tidak memenuhi
Probabilitas ekstrim kelompok diambil dari jumlah ekstrim	2.78E-01	1.00.E-04	Tidak memenuhi
Kriteria risiko sosial pada grafik			Tidak memenuhi

**Gambar 3.** Evaluasi risiko Bendungan Titab metode ETA

Analisis Mekanisme Kegagalan:

Berdasarkan hasil *Event Tree Analysis*, berikut adalah penjelasan mendalam mengenai mekanisme kegagalan pada komponen-komponen yang menjadi prioritas penanganan:

1. Puncak bendungan (retak memanjang)
Mekanisme kegagalan yang terjadi adalah *internal erosion* (erosi buluh) akibat infiltrasi air melalui retakan. Retakan ini terbentuk dari sisa konsolidasi material timbunan inti yang belum selesai. Saat hujan, air masuk ke dalam retakan, melunakkan material inti dan menciptakan jalur rembesan. Jika tekanan air pori meningkat signifikan, partikel halus inti bendungan akan tergerus, memicu *piping* yang berujung pada runtuhnya puncak bendungan.
2. Bangunan intake (kegagalan pada conduit)
Mekanisme kegagalan dipicu oleh semburan liar atau *blow out* pada atap *intake tower* yang pernah terjadi pada Tahun 2016. Meskipun sudah dilakukan perbaikan pada atap dan conduit bangunan *intake*, pada kondisi banjir debit aliran dikhawatirkan melebihi kapasitas desain conduit dan dapat menyebabkan tekanan hidrostatik ekstrem pada dinding conduit. Tekanan yang disebabkan semburan akan menggerus material timbunan di sekitar conduit, menghilangkan

penyangga tanah (*loss of support*), dan akhirnya meruntuhkan struktur dinding pembatas conduit.

3. Toe drain

Mekanisme yang teridentifikasi adalah *uplift pressure* (tekanan angkat) dari akuifer tertekan di bawah pondasi. Meskipun rembesan ini bukan berasal dari tubuh bendungan (bocoran waduk), tekanan air tanah yang tinggi di area hilir kaki bendungan dapat mengurangi tegangan efektif tanah. Hal ini berpotensi menyebabkan semburan (*boiling*) di kaki hilir bendungan, yang secara bertahap dapat mengganggu stabilitas lereng hilir jika sistem drainase tidak mampu mengalirkan debit rembesan tersebut dengan cepat.

3.3.2 Metode Andersen

Selain menggunakan metode *Event Tree Analysis* (ETA), digunakan metode Andersen. Hasil inspeksi lapangan pada bendungan dan bangunan pelengkapannya menjadi parameter penilaian untuk mendapatkan faktor kepentingan awal (I_{dam}) dan nilai indeks risiko total (IR_{tot}), sehingga dapat dihitung nilai keamanan bendungan (N_{aman}). Hasil perhitungan menggunakan metode Andersen dapat dilihat pada Tabel 8 dan Tabel 9. Berdasarkan hasil perhitungan, didapatkan nilai keamanan bendungan (N_{aman}) sebesar 66.33 atau dengan klasifikasi CUKUP.

Tabel 8. Parameter penilaian faktor kerawanan total dan faktor tingkat kepentingan awal

Parameter Bobot	Kuantitas	Nilai Bobot
Tinggi Bendungan (I_1)	59.90 m	10
Tipe Bendungan (I_2)	Bendungan Urugan Tanah (UT)	4
Tipe Pondasi (I_3)	Pondasi Urugan Batu	1
Kapasitas Waduk (I_4)	12.8 juta m ³	6
Umur Bendungan (E_1)	9 tahun	10
Kondisi Kegempaan (E_2)	Buleleng Bali. Zona E (tinggi)	10
Kapasitas Pelimpah (D_1)	Memenuhi	5
Stabilitas Bendungan (D_2)	Aman (Laporan Ringkasan Bendungan Titab)	1
Faktor Bencana (H)	Sedang	5
$I_{dam} = (((I_1+I_2+I_3+I_4)/4) \times ((E_1+E_2)/2) \times ((D_1+D_2)/2)) \times H$		787.50

Tabel 9. Penilaian indeks kepentingan relatif dan indeks risiko total

Parameter Bobot	Kuantitas	Nilai Bobot Kondisi Lapangan (CF_i)	Indeks Kepentingan Relatif (RI_j)	Indeks Risiko (IR_j)
Penghalang pada saluran pelimpah (CF_1)	59.90 m	8	115.76	23.15
Tinggi jagaan (<i>free board</i>) (CF_2)	Bendungan Urugan Tanah (UT)	8	38.59	7.72
Penghalang pada Saluran Pengeluaran di bagian bawah bendungan (CF_3)	Pondasi Urugan Batu	7	231.53	69.46
Erosi (<i>erosion</i>) pada saluran pelimpah (CF_4)	12.8 juta m ³	7	49.61	14.88
Material pelindung permukaan bendungan (CF_5)	9 tahun	8	21.26	4.25
Erosi Buluh (<i>piping</i>) pada tubuh bendungan tipe urugan (CF_6)	Buleleng Bali, Zona E (tinggi)	5	176.40	88.20
Erosi Buluh (<i>piping</i>) pada pondasi bendungan tipe urugan (CF_7)	Memenuhi	5	75.60	37.80
Longsoran pada bendungan tipe urugan (CF_8)	Aman	7	39.38	11.81
Longsoran pada bendungan dan fondasinya (CF_9)	Sedang	8	39.38	7.88
Total		63	787.5	265.15
$N_{aman} = (I_{dam} - IR_{tot}) / I_{dam} \times 10$			66.33	

3.4 Perbandingan dengan Studi Sejenis

Nilai keamanan Bendungan Titab sebesar 66.33 (Kategori CUKUP) menunjukkan profil risiko yang unik jika dibandingkan dengan bendungan lain di Indonesia. Sebagai perbandingan, Bendungan Nglangon memiliki nilai keamanan 89.11 (MEMUASKAN) (Herawanto et al., 2023), yang menunjukkan kondisi fisik yang jauh lebih prima meskipun usianya lebih tua. Sebaliknya, Bendungan Pelaparado mencatat nilai keamanan 56.76 (KURANG MEMUASKAN) (Suprpto et al., 2021) yang mengindikasikan perlunya rehabilitasi berat. Bendungan Prijetan, yang merupakan bendungan tertua di Indonesia dengan usia operasi 107 tahun, menggunakan metode ICOLD modified dan FMEA untuk penilaian risiko dengan fokus pada deterioration fisik dan dampak perubahan iklim (Pakpahan et al., 2024).

Posisi Bendungan Titab berada di antara kedua ekstrem tersebut. Berbeda dengan Bendungan Palasari yang juga dikategorikan CUKUP namun mayoritas

masalahnya bersifat non-struktural (Pamungkas et al., 2023), Bendungan Titab memiliki isu spesifik pada retakan puncak yang bersifat struktural. Hal ini menegaskan bahwa meskipun Bendungan Titab relatif baru yaitu baru beroperasi Tahun 2018, adanya anomali geoteknik (siswa konsolidasi) memberikan kontribusi signifikan terhadap penurunan nilai keamanannya dibandingkan bendungan sejenis. Perbandingan ini menjadi tolak ukur urgensi prioritas penanganan terhadap potensi risiko yang dapat terjadi kembali di Bendungan Titab dan tidak boleh dianggap remeh hanya karena usia bendungan yang masih muda.

3.5 Evaluasi Risiko dan Rencana Penanganan

Hasil analisis probabilitas ekstrim individu dan kelompok pada metode *Even Tree* didapatkan nilai probabilitas risiko berada di atas nilai toleransi risiko yaitu sebesar 1.00E-05, maka perlu dilakukan penanganan pada Bendungan Titab. Penanganan yang perlu dilakukan antara lain yaitu:

1. Pada retakan memanjang yang melintas pada puncak bendungan perlu dilakukan pengukuran

bukaan dan kedalaman retakan secara rutin serta perbaikan dengan mengisi retakan dengan material tertentu;

2. Dalam kondisi konduit kemungkinan tidak mampu menampung air yang mengalir saat kondisi banjir, maka perlu perhatian khusus dan penanganan segera apabila dinding penyekat konduit mengalami keruntuhan;
3. Pada *toe drain* bendungan terdapat debit rembesan yang diindikasikan berasal dari akuifer yang tertekan, maka perlu dilakukan pengamatan debit rembesan saat kondisi kering dan kondisi terpengaruh hujan untuk memastikan rembesan besar yang terjadi tidak berasal dari tubuh bendungan.

Sedangkan pada metode Andersen didapatkan nilai keamanan (N_{aman}) bendungan sebesar 66.33. Nilai keamanan bendungan berada pada klasifikasi CUKUP, maka untuk meningkatkan nilai keamanan dan meminimalkan risiko kegagalan bendungan, diperlukan penanganan pada kerusakan yang tercatat pada saat inspeksi.

4. KESIMPULAN

Hasil identifikasi bahaya pada Bendungan Titab mengidentifikasi lima komponen utama, yaitu puncak bendungan, lereng hulu dan hilir bendungan, bangunan *spillway*, bangunan *intake*, serta *toe drain* dan hilir kaki bendungan. Penentuan prioritas mode kegagalan menggunakan metode FMECA menunjukkan urutan prioritas penanganan, dimana puncak bendungan sebagai prioritas pertama, diikuti bangunan *intake* sebagai prioritas kedua, dan *toe drain* serta hilir kaki bendungan sebagai prioritas ketiga. Penilaian risiko dengan metode *Event Tree Analysis* (ETA) menghasilkan nilai probabilitas ekstrim individu dan probabilitas ekstrim kelompok yang keduanya melampaui batas toleransi yang ditetapkan, sehingga memerlukan tindakan penanganan terhadap komponen-komponen prioritas tersebut. Selain itu, penilaian risiko menggunakan metode Andersen menghasilkan nilai keamanan sebesar 66.33, yang mengklasifikasikan bendungan dalam kategori CUKUP sehingga diperlukan upaya perbaikan terhadap kerusakan yang teridentifikasi selama inspeksi untuk meminimalkan risiko kegagalan bendungan. Selanjutnya, untuk dapat melakukan penilaian risiko secara merinci diperlukan data informasi secara lengkap antara lain dokumen perencanaan, pelaksanaan, *asbuilt drawing*, monitoring instrumentasi serta operasi dan pemeliharaan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adamo, N., Al-Ansari, N., Laue, J., Knutsson, S., & Sissakian, V. (2017). Risk Management Concepts in Dam Safety Evaluation: Mosul Dam as a Case Study. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 11(7). <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2017.07.002>
- Andersen, G. R., Chouinard, L. E., Bouvier, C., & Back, W. E. (1999). Ranking Procedure on Maintenance Tasks for Monitoring of Embankment Dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(4), 247–259. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1999\)125:4\(247\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:4(247))
- Andersen, G. R., Cox, C. W., Chouinard, L. E., & Hover, W. H. (2001). Prioritization of Ten Embankment Dams According to Physical Deficiencies. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 335–345. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:4\(335\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:4(335))
- Apriana, Y., Nurkholis, N., & Prihatiningtyas, Y. W. (2025). Risk Assessment of Dam Management: A Case Study on the Semantok Dam Management Unit. *Jurnal Locus Penelitian Dan Pengabdian*, 4(7), 4270–4288. <https://doi.org/10.58344/locus.v4i7.4398>
- Costa, J. E. (1985). *Floods from Dam Failures*. <https://doi.org/10.3133/ofr85560>
- Fadli, A., Sriyana, I., & Sangkawati, S. (2023). Kembangan Dam Safety Risk Index Sragen Regency. *International Journal of Science and Society*, 5(5), 473–487. <https://doi.org/10.54783/ijssoc.v5i5.905>
- Fernandes, R., Sieira, A. C., & Menezes Filho, A. (2022). Methodology for risk management in dams from the event tree and FMEA analysis. *Soils and Rocks*, 45(3), 1–15. <https://doi.org/10.28927/SR.2022.070221>
- Firmansyah, R., & Sriyana, I. (2022). Penilaian Risiko Bendungan Saguling Dengan Metode Tradisional, Metode Pohon Kejadian Dan Metode Modifikasi ICOLD. *Wahana Teknik Sipil: Jurnal Pengembangan Teknik Sipil*, 27(1), 76. <https://doi.org/10.32497/wahanats.v27i1.3673>
- Fu, X., Gu, C. S., Su, H. Z., & Qin, X. N. (2018). Risk Analysis of Earth-Rock Dam Failures Based on Fuzzy Event Tree Method. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/ijerph15050886>
- Herawanto, B., Suripin, S., & Wulandari, D. A. (2023). Penilaian Risiko Kegagalan Bendungan Dan Tindakan Pengurangan Risiko Pada Bendungan Nglangon. *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 11(1), 48–57. <https://doi.org/10.33084/mts.v11i1.4071>
- Indrawan, D., Ibrahim Tanjung, M., & Sadikin, N. (2013). Penilaian Indeks Risiko Metode Modifikasi Andersen Dan Modifikasi Icold Untuk 12 Bendungan Di Pulau Jawa. *Jurnal Sumber Daya Air*, 9, 93–104. <https://doi.org/10.32679/jsda.v9i2.150>
- Ismijayanti, D., Kodoatie, R. J., & Edhisono, S. (2023). Penilaian Risiko Bendungan Manggar Dengan Metode Modifikasi ICOLD. *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 11(3), 176–182. <https://doi.org/10.33084/mts.v11i3.4699>
- Kementerian Pekerjaan Umum. (2011). *Pedoman Teknis Penilaian Risiko Bendungan*. <https://sda.pu.go.id/balai/teknikbendungan/pedoman>
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2024). *Laporan Inspeksi Besar Bendungan Titab 2024*.
- Pakpahan, S. S., Sangkawati, S., & Suharyanto, S. (2024). Risk Analysis of the Prijetan Dam in Lamongan Regency. *Journal La Multiapp*, 5(6), 933–945. <https://doi.org/10.37899/journallamultiapp.v5i6.1736>

- Pamungkas, Z. A. J., Nugroho, H., & Sadono, K. W. (2023). Penilaian Indeks Risiko Metode Modifikasi Andersen dan Metode Modifikasi ICOLD untuk Bendungan Palasari, Bendungan Gerokgak dan Bendungan Benel. *Jurnal Serambi Engineering*, *VIII*(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.32672/jse.v8i1.5361>
- Pramudawati, M. A. H., Ibrahim Tanjung, M., & Ghafara, R. (2020). Penilaian Risiko Keamanan Bendungan di Jawa Timur. *Jurnal Teknik Hidraulik*, *11*(2), 93–102. <https://doi.org/10.32679/jth.v11i2.631>
- PT. Indra Karya (Persero). (2022). *Laporan Akhir Pelaksanaan Konstruksi Bendungan Titab 2011-2021*.
- Rahman, A., & Fahma, F. (2021). Penggunaan Metode FMECA (Failure Modes Effects Critically Analysis) dalam Identifikasi Titik Kritis di Industri Kemasan. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 110–119. <https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2021.31.1.110>
- Republik Indonesia. (2007). *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana*. <https://jdih.pu.go.id/internal/assets/assets/produk/UU/2007/04/2007uu24.pdf>
- Republik Indonesia. (2008). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 21 Tahun 2008 tentang Penyelenggaraan Penanggulangan Bencana*. <https://bnpb.go.id/storage/app/media/uploads/migration/pubs/4.pdf>
- Riando, M., Darsono, S., & Nugroho, H. (2023). *Journal of Mechanical, Civil and Industrial Engineering Modified Andersen and Modified ICOLD (DOISP-2) Methods of Risk Score for Dams in West Region of Indonesia*. <https://doi.org/10.32996/jmcie>
- 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). <https://doi.org/10.3390/min11111234>
- Suprpto, R. E., Japarussidik, J., Sriyana, S., & Sadono, K. W. (2021). Penilaian Risiko Bendungan Pelaparado Berbasis Metode Modifikasi ICOLD dan Metode Indeks Risiko. *TEKNIK*, *42*(2), 226–235. <https://doi.org/10.14710/teknik.v42i2.39715>
- Wang, T., Li, Z., Ge, W., Zhang, Y., Jiao, Y., Zhang, H., Sun, H., & van Gelder, P. (2023). Risk assessment methods of cascade reservoir dams: a review and reflection. *Natural Hazards*, *115*(2), 1601–1622. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05609-z>