JURNAL REKAYASA SIPIL (JRS-UNAND)
Vol. 22 No. 2, Juli 2026
Diterbitkan oleh:
Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas (Unand)
ISSN (Print) : 1858-2133
ISSN (Online) : 2477-3484
http://jrs.ft.unand.ac.id

PENILAIAN RISIKO KEGAGALAN DAN MITIGASI RISIKO BENDUNGAN SUTAMI

RIZKI HAMDANI[1*], SUKAMTA[2], SUHARYANTO[3]

[1] *Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Jawa Tengah*
[2] *Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Jawa Tengah*
[3] *Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Jawa Tengah*

[*]*Corresponding Author: rizkihamdani@students.undip.ac.id*

Naskah diterima: 16 April 2026. Disetujui: 28 Juli 2026. Diterbitkan: 31 Juli 2026

ABSTRAK

Disamping memberikan manfaat yang signifikan bagi kehidupan masyarakat, keberadaan bendungan juga menyimpan potensi risiko yang tidak dapat diabaikan. Keruntuhan suatu bendungan berpotensi menimbulkan banjir bandang yang mengakibatkan korban jiwa, kerugian harta benda, serta kerusakan lingkungan yang parah di kawasan hilir. Kondisi ini khususnya relevan bagi bendungan yang telah beroperasi dalam jangka waktu lama dan memerlukan kegiatan pemeliharaan intensif berupa perbaikan maupun rehabilitasi. Guna meminimalkan risiko kegagalan bendungan, diperlukan penilaian risiko yang komprehensif untuk menganalisis dan mengevaluasi potensi bahaya yang ada. Penelitian ini melakukan penilaian risiko Bendungan Sutami dengan menggunakan tiga pendekatan metode, yaitu metode pohon kejadian (event tree), dan metode tradisional, serta metode modifikasi ICOLD. Hasil identifikasi mode kegagalan menggunakan FMECA menunjukkan bahwa komponen kebocoran Waterway PLTA memiliki nilai kekritisan tertinggi (Cr = 64), sehingga menjadi prioritas utama analisis lanjutan. Temuan penelitian berdasarkan metode tradisional dan metode pohon kejadian menunjukkan nilai probabilitas kegagalan pada komponen kritis Bendungan Sutami berada pada kisaran 1,00E-05 hingga 3,65E-02, yang melampaui ambang kriteria risiko yang dapat diterima sehingga dikategorikan "Tidak Memenuhi". Adapun berdasarkan metode modifikasi ICOLD, diperoleh nilai indeks risiko sebesar 67 dengan klasifikasi risiko "Tinggi", yang mengindikasikan bahwa Bendungan Sutami memerlukan perhatian khusus berupa tindakan perbaikan teknis dan terjadwal untuk mereduksi risiko kegagalan.

Kata kunci : Kegagalan Bendungan; Penilaian Risiko; Modifikasi ICOLD; Tindakan Perbaikan

1. PENDAHULUAN

Bendungan Sutami berdiri di aliran Sungai Brantas, berlokasi di Desa Karangkates, Kecamatan Sumberpucung, Kabupaten Malang, sekitar 14 km ke arah hilir dari Bendungan Sengguruh dan berjarak kurang lebih 35 km dari pusat Kota Malang. Dengan ketinggian mencapai 100 meter, bendungan ini dibangun menggunakan tipe timbunan batu berinti kedap air. Keberadaan Waduk Sutami memberikan manfaat multifungsi, meliputi

pengendalian banjir, penyediaan air irigasi seluas 34.000 ha, pemenuhan air baku, pembangkitan tenaga listrik berkapasitas 3 × 35 MW, serta pengembangan sektor pariwisata.

Di balik berbagai manfaat yang diberikan, keberadaan bendungan juga menyimpan risiko yang tidak dapat diabaikan. Keruntuhan bendungan berpotensi memicu banjir bandang dahsyat yang dapat menimbulkan korban jiwa, kerugian harta benda, serta kerusakan lingkungan yang masif di wilayah hilir. Upaya pencegahan kegagalan bendungan berlandaskan pada tiga konsepsi keamanan bendungan, yaitu: (1) keamanan struktural, (2) operasi, pemeliharaan dan pemantauan, serta (3) kesiapsiagaan dalam menghadapi kondisi darurat (Mulyono, 2017). Oleh karena itu, pemerintah menetapkan pengaturan khusus terkait keamanan bendungan guna memastikan pengelolaan yang tertib dan aman, sehingga fungsi serta keamanan bendungan senantiasa terjaga, sebagai bentuk upaya menjaga keselamatan jiwa, harta benda, dan lingkungan merupakan inti dari sistem keamanan bendungan. Predikat "aman" pada suatu bendungan diberikan apabila seluruh tahapan pembangunan dan pengelolaannya telah selaras dengan norma, regulasi, standar, pedoman, dan manual (NSPM) yang ditetapkan sebagai acuan keamanan bendungan di Indonesia.

Kajian risiko yang dilaksanakan pada bendungan yang tengah berada dalam fase perencanaan bertujuan untuk merumuskan kriteria rancangan serta mengoptimalkan desain guna menekan potensi bahaya sejak tahap awal. Sebaliknya, pada bendungan yang telah beroperasi, evaluasi risiko diarahkan untuk mengukur apakah tingkat risiko yang ada masih dalam batas yang dapat diterima, apabila tidak, maka perlu disusun langkah-langkah pengendalian risiko yang komprehensif dan terencana. Mengacu pada klasifikasi yang dikemukakan oleh *International Commission on Large Dams* (ICOLD) dalam Soentoro (2013), terdapat tiga pendekatan dalam penilaian risiko bendungan, yaitu metode standar, metode kualitatif, dan metode kuantitatif yang melibatkan analisis probabilistik dan integrasi penuh terhadap seluruh skenario mekanisme kegagalan. Kerangka klasifikasi ini diperkuat oleh (ICOLD, 2005) dalam Bulletin 130, yang menekankan bahwa pendekatan penilaian risiko bendungan harus mempertimbangkan manfaat, metode, dan penerapan praktis secara menyeluruh sebelum diadopsi pada bendungan yang telah beroperasi.

Metode modifikasi ICOLD dikembangkan sebagai turunan dari panduan ICOLD tahun 1989 yang mengatur pemilihan parameter kegempaan pada bendungan besar. Ditjen Sumber Daya Air, Kementerian PUPR, mulai mengimplementasikan metode ini sejak 2008 dengan berbagai penyesuaian yang diselaraskan terhadap karakteristik dan kondisi nyata bendungan-bendungan di Indonesia (Herawanto et al., 2023).

Salah satu bendungan yang telah beroperasi dalam jangka panjang adalah Bendungan Sutami, yang dibangun antara tahun 1961 hingga 1972 dan kini telah melampaui usia lebih dari 50 tahun. Berlokasi di Desa Karangkates, Kecamatan Sumber Pucung, Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur, bendungan ini merupakan infrastruktur terbesar dalam pengelolaan Perum Jasa Tirta I. Kementerian Pekerjaan Umum merekomendasikan agar penilaian risiko bendungan dilaksanakan minimal setiap 10 tahun sekali, bersamaan dengan pemeriksaan besar, khususnya bagi bendungan dengan tinggi di atas 75 m dan/atau kapasitas tampungan tidak kurang dari 100 juta m^3, serta bendungan yang tergolong dalam kategori tingkat bahaya tinggi berdasarkan pedoman klasifikasi bahaya bendungan yang berlaku.

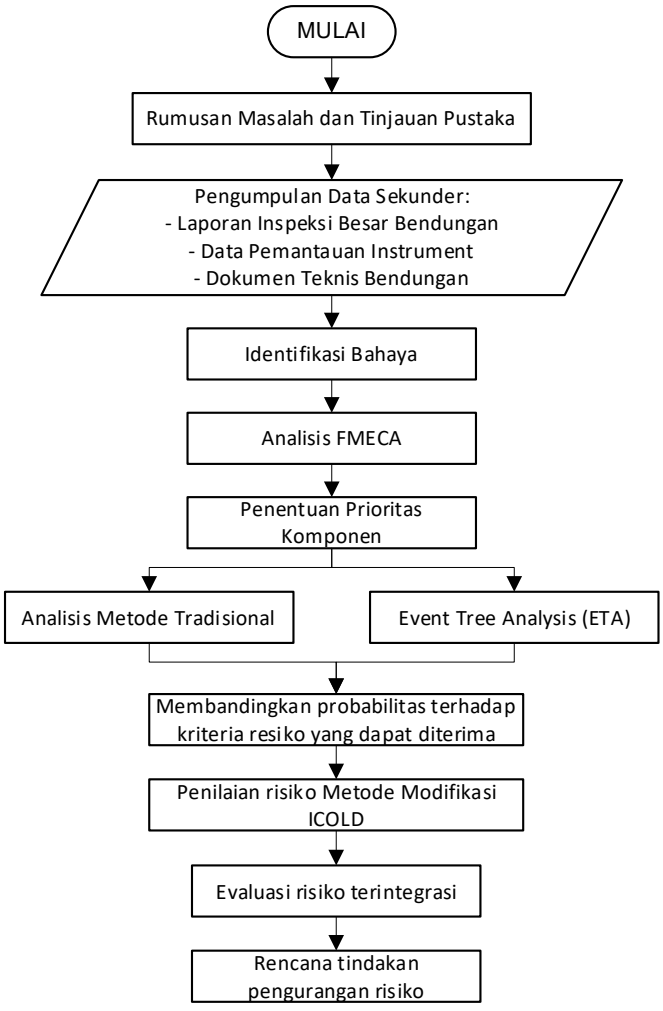
Mengingat usia operasional Bendungan Sutami yang telah melampaui setengah abad, maka diperlukan kajian risiko yang komprehensif sebagai dasar pengambilan keputusan pengelolaan keamanan bendungan. Tujuan penelitian ini adalah melakukan penilaian risiko kegagalan Bendungan Sutami menggunakan metode pohon kejadian, metode tradisional,

dan metode modifikasi ICOLD, serta merumuskan rekomendasi tindakan pengurangan risiko berdasarkan hasil analisis yang diperoleh.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Kerangka Alur Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus kuantitatif-semikuantitatif yang mengintegrasikan tiga metode penilaian risiko, yaitu metode tradisional, metode pohon kejadian (*Event Tree Analysis*/ETA), dan metode modifikasi ICOLD, dengan FMECA sebagai tahap identifikasi dan pemeringkatan mode kegagalan yang menjembatani ketiga metode tersebut. Keterkaitan antar metode dijelaskan sebagai berikut: FMECA digunakan pada tahap awal untuk mengidentifikasi dan memeringkatkan komponen bendungan berdasarkan tingkat kekritisan (Cr), sehingga diperoleh daftar prioritas komponen yang memerlukan analisis probabilitas lebih lanjut.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Komponen-komponen dengan kekritisan tertinggi hasil FMECA kemudian dianalisis secara paralel menggunakan metode tradisional dan metode pohon kejadian untuk menghitung probabilitas kegagalan pada masing-masing skenario. Hasil probabilitas dari kedua metode

tersebut selanjutnya diplotkan pada grafik kriteria risiko bendungan eksisting diagram (Kementerian PUPR, 2011) untuk menentukan status "memenuhi" atau "tidak memenuhi". Secara paralel, metode modifikasi ICOLD diterapkan pada skala bendungan secara keseluruhan untuk menghasilkan indeks risiko dan klasifikasi kelas risiko. Hasil dari ketiga metode tersebut disintesis pada tahap evaluasi risiko untuk merumuskan rencana tindakan pengurangan risiko. Alur penelitian secara lengkap disajikan pada Gambar 1.

2.2. Analisis Risiko

Analisis risiko merupakan suatu pendekatan sistematis yang digunakan untuk mengestimasi frekuensi kemunculan suatu kejadian merugikan beserta besaran dampak yang ditimbulkannya, yang kemudian disusun secara logis dan divisualisasikan dalam bentuk diagram (Kementerian PUPR, 2011). Pelaksanaan analisis risiko dapat dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu pendekatan kualitatif yang menekankan pada identifikasi dan penilaian risiko secara deskriptif, maupun pendekatan kuantitatif yang berfokus pada estimasi probabilitas terjadinya risiko dengan mengidentifikasi sumber risiko dan menganalisis konsekuensi yang ditimbulkannya. Pendekatan kuantitatif ini juga ditegaskan oleh (Robert J. Kodoati, 2018), yang menyatakan bahwa keandalan analisis risiko keamanan bendungan sangat bergantung pada mutu dan kontinuitas data pemantauan instrumentasi sebagai basis estimasi probabilitas kegagalan.

2.3. Identifikasi Mode Kegagalan (FMECA)

Identifikasi mode kegagalan dilaksanakan menggunakan metode *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* (FMECA), yaitu suatu pendekatan semi-kuantitatif yang digunakan untuk mengevaluasi komponen atau sistem dengan menelaah potensi mode kegagalan beserta dampak yang mungkin ditimbulkannya diagram (Kementerian PUPR, 2011). Dalam metode ini, besarnya risiko suatu bahaya (R) ditentukan berdasarkan perkalian antara nilai kualitatif kemungkinan/probability (P) dengan nilai kualitatif konsekuensi/impact (I), sedangkan tingkat kekritisan (Cr) diperoleh dari perkalian nilai risiko (R) dengan nilai kualitatif keyakinan/confidence (C).

Dasar pemberian skor pada masing-masing parameter FMECA dijelaskan sebagai berikut. Nilai probability (P) diberikan berdasarkan hasil pengamatan visual pada inspeksi besar tahun 2016 (Perum Jasa Tirta I, 2016), dengan mengacu pada frekuensi kemunculan kondisi serupa yang tercatat dalam riwayat pemeliharaan bendungan serta data historis kejadian sejenis pada bendungan urugan lain, mengikuti kriteria kualitatif pada Tabel 1 yang membagi kemungkinan menjadi lima tingkat (sangat rendah hingga sangat tinggi) berdasarkan estimasi periode ulang kejadian (1 hingga 10.000 tahun). Nilai *impact* (I) diberikan berdasarkan telaah tim inspeksi dan tenaga ahli pengelola bendungan (Perum Jasa Tirta I) terhadap besaran dampak yang ditimbulkan apabila mode kegagalan tersebut berkembang, dengan mempertimbangkan potensi gangguan terhadap fungsi struktural bendungan (misalnya potensi erosi internal, longsoran, atau kehilangan volume tampungan). Nilai *confidence* (C) merepresentasikan tingkat keyakinan tim penilai terhadap keandalan data dan hasil pengamatan yang menjadi dasar penetapan nilai P dan I, yang ditentukan berdasarkan kelengkapan dokumentasi historis, konsistensi hasil pemantauan instrumentasi, serta frekuensi dan mutu inspeksi visual yang telah dilakukan pada komponen terkait. Ketiga parameter tersebut ditetapkan secara kolektif melalui *expert judgement* oleh tim inspeksi teknis Perum Jasa Tirta I bersama peneliti, dengan skala 1 (sangat rendah) hingga 5 (sangat tinggi) sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Kualitatif Kemungkinan (Kementerian PUPR, 2011)

Tingkat		Deskripsi	Kriteria	Nilai
Sangat Tinggi	E	Selalu Pasti (*Always Certain*)	-Dampak akan selalu terjadi -Dampak akan terjadi pada tiap kejadian -Kejadian sekali dalam 1 tahun	5
Tinggi	H	Mungkin Sekali (*Likely*)	-Dampak diharapkan akan terjadi -Dampak akan terjadi pada hampir tiap keadaan -Kejadian sekali dalam 10 tahun	4
Sedang	M	Mungkin (*Possible*)	-Dampak kemungkinan akan terjadi -Dampak pernah terjadi sebelumnya -Dampak akan terjadi pada beberapa keadaan -Kejadian sekali dalam 100 tahun	3
Rendah	L	Jarang (*Rare*)	-Dampak dapat terjadi suatu saat -Dampak pernah terjadi ditempat lain -Kejadian sekali dalam 1000 tahun	2
Sangat Rendah	N	Hampir Tidak Mungkin (*Improable*)	-Dampak dapat terjadi pada keadaan yang sangat luar biasa -Kejadian serupa pernah terjadi di tempat lain -Hampir tidak mungkin -Kejadian dalam 10.000 tahun	1

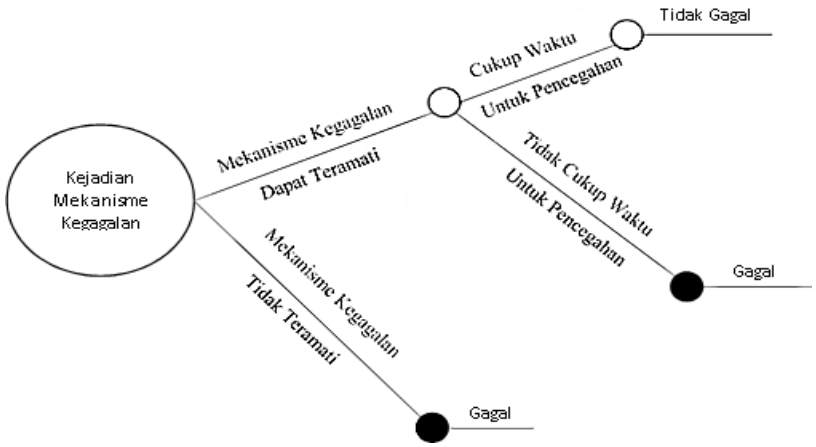
2.4. Metode Tradisional

Metode tradisional merupakan pendekatan estimasi probabilitas kegagalan yang bersifat semi-kuantitatif, dikembangkan dengan menelusuri riwayat kondisi komponen bendungan berdasarkan data inspeksi, catatan pemeliharaan, dan hasil pemantauan instrumentasi dari waktu ke waktu diagram (Kementerian PUPR, 2011). Berbeda dengan *Event Tree Analysis* yang memodelkan probabilitas berdasarkan struktur bercabang dari suatu peristiwa pemicu, metode tradisional menghitung probabilitas kegagalan langsung dari akumulasi bobot kondisi fisik komponen (misalnya derajat retakan, rembesan, deformasi, atau kebocoran) yang diobservasi pada inspeksi visual dan dibandingkan terhadap kriteria kegagalan komponen sejenis pada database bendungan yang telah terdokumentasi. Nilai probabilitas yang dihasilkan kemudian diklasifikasikan menggunakan skema pemetaan yang sama dengan Tabel 2 dan diplot pada grafik kriteria risiko yang dapat diterima (Gambar 2) sehingga hasilnya dapat dibandingkan secara langsung dengan hasil *Event Tree Analysis* sebagai bentuk verifikasi silang (*cross-check*) antar metode. Kesesuaian nilai probabilitas antara metode tradisional dan ETA pada penelitian ini mengindikasikan konsistensi hasil penilaian risiko terhadap komponen kritis Bendungan Sutami.

2.5. Perkiraan Probablitas Kegagalan Metode Pohon Kejadian (*Event Tree Analysis*)

Event Tree Analysis (ETA) adalah teknik analitis yang digunakan untuk memetakan seluruh kemungkinan hasil dari suatu peristiwa pemicu dalam sebuah sistem, mulai dari titik awal kejadian hingga berbagai skenario akhir yang mungkin terjadi. Dalam konteks penilaian keamanan bendungan, tahapan penyusunan mekanisme kegagalan menjadi bagian inti dari analisis probabilitas kegagalan dengan metode pohon kejadian, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2. Penggunaan ETA sebagai instrumen baku dalam analisis risiko bendungan juga direkomendasikan oleh (*United States Bureau of Reclamation & United States Army Corps of Engineers*, 2019), yang menempatkan metode pohon kejadian sebagai salah satu *best practice* dalam mengidentifikasi, mencirikan, dan mengestimasi risiko kegagalan bendungan maupun tanggul.

Nilai probabilitas pada setiap cabang pohon kejadian diperoleh melalui prosedur berikut: (1) peristiwa pemicu (*initiating event*) ditetapkan berdasarkan mode kegagalan hasil FMECA dengan kekritisan tertinggi; (2) setiap simpul (*node*) lanjutan merepresentasikan tahapan perkembangan mekanisme kegagalan (misalnya inisiasi rembesan, perkembangan erosi internal, hingga potensi keruntuhan struktur), yang masing-masing diberi nilai probabilitas kondisional berdasarkan skema pemetaan probabilitas pada Tabel 2; (3) penetapan nilai probabilitas kondisional pada tiap simpul mengacu pada ketersediaan bukti empiris berupa data historis kejadian sejenis (*data base*), hasil pemantauan instrumentasi, serta *expert judgement* tim inspeksi apabila data historis langsung tidak tersedia; dan (4) nilai probabilitas pada simpul akhir (*end node*) dihitung secara kumulatif dengan mengalikan seluruh nilai probabilitas kondisional pada rantai kejadian menuju simpul tersebut (P_total = P1 × P2 × ... × Pn), sehingga diperoleh distribusi probabilitas pada lima kategori keparahan, yaitu ekstrim (E), tinggi (H), sedang (M), rendah (L), dan normal (N) (Kementerian PUPR, 2011). Pendekatan serupa juga diterapkan oleh (Fu et al., 2018) dalam analisis risiko kegagalan bendungan urugan tanah (*earth-rock dam*), yang mengembangkan metode pohon kejadian berbasis teori himpunan fuzzy untuk menghitung probabilitas kegagalan pada kondisi data historis yang terbatas.



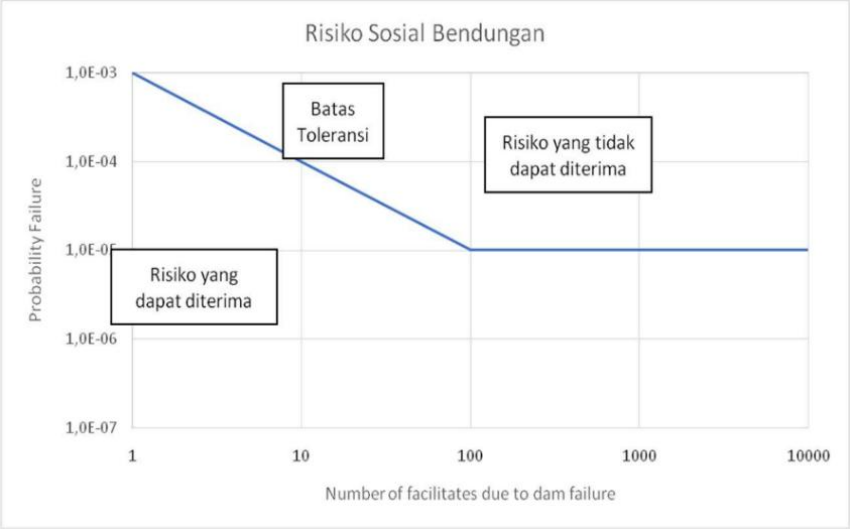
Gambar 2. Diagram mekanisme kegagalan dan tindakan pencegahan pada pohon kejadian (Kementerian PUPR, 2011)

Tabel 2. Skema pemetaan probabilitas (Kementerian PUPR, 2011)

Deskripsi Keadaan atau Kejadian	Urutan Penetapan Besaran Probabilitas
Kejadian pasti terjadi	1
Kejadian atau peristiwa teramati dalam *data base*	0,1
Kejadian atau peristiwa tidak teramati, atau teramati pada suatu kejadian kecil dalam data base yang ada; beberapa potensi skenario kegagalan dapat diindentifikasi	0,01
Kejadian atau peristiwa tidak teramati dalam data base yang ada. Sulit untuk diidentifikasi mengenai adanya skenario kegagalan yang masuk akal, namun satu skenario dapat diidentifikasi setelah dilakukan	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

Skema pemetaan probabilitas dalam metode pohon kejadian menggunakan nilai acuan mulai dari 1 (kejadian pasti terjadi) hingga 0,0001 (kejadian belum pernahi teramati dan tidak ada skenario yang dapat diidentifikasi), untuk lebihi detailnya dapat dilihat pada Tabel 2. Nilai probabilitas yang diperoleh dari masing-masing komponen kemudian diplotkan pada grafik kriteria risiko bendungan eksisting untuk menentukan apakah risiko tersebut berada dalam batasi yang dapat diterima atau tidak.

Hasil metode pohon kejadian dan tradisional berupa probabilitas individu dan probabilitas kelompok selanjutnya diplotkan seperti **Gambar 3.**



Gambar 3. Kriteria resiko yang dapat diterima bendungan eksisting (Kementerian PUPR, 2011)

2.6. Penilaian Resiko Metode Modifikasi ICOLD

Penerapan metode modifikasi ICOLD dalam penelitian ini diawali dengan perhitungan tingkat kepentingan bendungan menggunakan parameter-parameter terbobot yang telah ditetapkan. Menurut (Suprapto et al., 2021), penentuan peringkat indeks risiko dan kategori keamanan bendungan memerlukan sejumlah parameter utama berupa bobot nilai (*score*) yang disusun berdasarkan tingkat prioritas risikonya. Berbeda dengan metode ICOLD standar yang hanya mempertimbangkan kapasitas waduk/tampungan dan tinggi bendungan, metode modifikasi ini memperluas cakupan analisis dengan menambahkan parameter kebutuhan evakuasi, potensi kerusakan di kawasan hilir, serta risiko bisnis akibat keruntuhan bendungan.

Dalam metode modifikasi ICOLD, identifikasi defisiensi struktural yang berpotensi menyebabkan kegagalan bendungan dikelompokkan ke dalam tiga kategori utama, yaitu: (1) stabilitas statik, (2) kapasitas banjir, dan (3) ketahanan terhadap gempa. Setelah seluruh parameter dijumlahkan, hasilnya diklasifikasikan berdasarkan nilai total yang diperoleh: nilai 0-15 dikategorikan sebagai "*Low*" (Rendah), 16-45 sebagai "*Moderate*" (Sedang), 46-75 sebagai "*High*" (Tinggi), dan di atas 75 sebagai "*Extreme*" (Ekstrim) (Indrawan, 2013). Penentuan nilai indeks risiko secara rinci dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Penentuan indeks risiko (IR) untuk Bendungan di Indonesia (Ismijayanti et al., 2023)

Risiko Kelas	Ekstrim		Tinggi		Sedang		Rendah	
	Parameter	Nilai	Parameter	Nilai	Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Kontribusi terhadap risiko (penilaian yang layak diberikan)								
Volume Waduk (Juta m3)	>120	6	120 - 1	4	1 - 0,1	2	<0,1	0
Tinggi Bendungan (m)	>45	6	45 - 30	4	30 - 15	2	>15	0
Penduduk di evakuasi (Jumlah orang)	>250.000	12	10 - 150 ribu	8	1-10 ribu	4	0	0
Potensi kerusakan di daerah hilir bendungan (terhadap struktur yang sudah ada)	Ekstrim	18	Tinggi	12	Sedang	8	Rendah	4
Faktor Tambahan untuk Bendungan yang sudah ada								
Ketersediaan data pembangunan & pemeliharaan	Tinggi	0	Sedang	1	Rendah	2	Tidak ada	3
Pengamatan instrumentasi bendungan	Tinggi	0	Sedang	1	Rendah	2	Tidak ada	3
Tingkat usaha yang dilakukan pada evaluasi keamanan sebelumnya	Tinggi	0	Sedang	1	Rendah	2	Tidak ada	3
Perkembangan hilir yang baru atau yang akan datang	Tinggi	3	Sedang	2	Rendah	1	Tidak ada	0
Faktor tambahan untuk mengatasi defisiensi struktural								
Kapasitas banjir terhadap dengan kegagalan	Ekstrim	6	Tinggi	4	Sedang	2	Rendah	0
Stabilitas statis terhadap kegagalan bendungan	Ekstrim	18	Tinggi	12	Sedang	6	Rendah	0
Ketahanan terhadap gempa	Ekstrim	12	Tinggi	8	Sedang	4	Rendah	0

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Identifikasi Bahaya

Hasil pengamatan visual dalam rangkaian kegiatan inspeksi besar yang dilaksanakan pada tahun 2016 (Perum Jasa Tirta I, 2016) menghasilkan sejumlah temuan berupa identifikasi potensi bahaya pada Bendungan Sutami, yang secara rinci disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Identifikasi Bahaya

No	Komponen	Potensi Bahaya	Penyebab	Mode Kegagalan	Foto Potensi Bahaya
1	Tubuh Bendungan (Puncak)	Retakan memanjang pada permukaan jalan di puncak bendungan	Terjadi Penurunan pada bagian tubuh bendungan	Memungkinkan air hujan masuk ke tubuh bendungan, sehingga akan merusak lapisan inti bendungan dan dapat mengganggu keamanan struktur bendungan	
2	Lereng Hulu Bendungan	Deformasi (Menggembung dan Menurun)	Terlihat adanya tumbuhan liar maupun areal yang mengindikasikan adanya gejala pelapukan	Kemungkinan terjadinya rembesan pada tubuh bendungan dan perubahan kondisi stabilitas bendungan, sehingga dapat menyebabkan longsoran pada lereng hulu dan Hilir	
3	Kaki Bendungan	Tersumbatnya saluran drainase	Terdapat sampah dan ditumbuhi tanaman liar	Akar tanaman liar mengganggu akses jalan pemeriksaan sehingga menggangu inspeksi berkala dan saluran drainase yang tersumbat.	
4	*Spillway*	Terjadi longsoran dibagian tumpuan jembatan *Spillway* serta retakan joint chute *Spillway*	Terjadinya deformasi dibagian *Spillway* sehingga pondasi tumpuan menggantung	Bocoran di bagian dinding retakan dinding *Spillway* serta stabilitas tumpuan jembatan yang terganggu	 

No	Komponen	Potensi Bahaya	Penyebab	Mode Kegagalan	Foto Potensi Bahaya
5	Kebocoran Water way PLTA	Kebocoran di dalam *Waterway* PLTA	Adanya tekanan pada saat melakukan pengambilan dan terjadinya pengikisan pada saat pengoperasian	Kebocoran *Waterway* PLTA berimplikasi pada hilangnya volume air yang pada gilirannya menginduksi aliran air ke dalam tubuh bendungan dan berpotensi memicu terjadinya internal erosion yang dapat mengancam keamanan dan stabilitas bendungan secara keseluruhan.	 
6	Waduk	Sedimentasi pada area genangan waduk	Tingginya tingkat sedimentasi dari hulu bendungan dan kurang optimalnya operasi dan pemeliharaan	Tertutupnya intake dan berkurangnya tampungan waduk akibat sedimentasi	

3.2 Identifikasi Mode Kegagalan

Tahap selanjutnya setelah identifikasi bahaya adalah analisis mendalam terhadap masing-masing komponen menggunakan metode FMECA, yang mengkaji secara terintegrasi aspek mode kegagalan, kekritisan, dan dampaknya. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa komponen kebocoran Waterway PLTA memperoleh nilai kekritisan (Cr) tertinggi sebesar 64 (P = 4, I = 4, C = 4; R = 16), diikuti oleh tubuh bendungan bagian puncak dengan Cr = 48 dan Spillway dengan Cr = 36.

Nilai kekritisan tertinggi pada komponen kebocoran Waterway PLTA dapat dijelaskan melalui tiga faktor utama. Pertama, nilai kemungkinan (P = 4, kategori "Tinggi"/Likely) ditetapkan karena kebocoran pada Waterway PLTA telah teramati secara konsisten pada setiap kegiatan inspeksi dan operasi, sehingga tergolong dampak yang diharapkan terjadi hampir pada setiap keadaan operasional, bukan lagi kejadian insidental. Kedua, nilai konsekuensi (I = 4, kategori "Tinggi") ditetapkan karena kebocoran Waterway berimplikasi langsung pada hilangnya volume air yang mendorong aliran air masuk ke dalam inti tubuh bendungan, sehingga berpotensi memicu erosi internal (internal erosion) yang merupakan salah satu mekanisme kegagalan paling kritis pada bendungan urugan tanah berinti kedap air, karena dapat berkembang secara progresif dan sulit terdeteksi pada tahap awal. Ketiga, nilai keyakinan (C = 4, kategori "Tinggi") ditetapkan karena kondisi kebocoran ini telah terdokumentasi secara konsisten pada beberapa siklus inspeksi dan didukung oleh data pemantauan piezometer serta debit rembesan, sehingga tim penilai memiliki keyakinan tinggi terhadap keandalan data pendukung. Kombinasi ketiga nilai tersebut (P x I x C = 4 x

4 x 4 = 64) menghasilkan tingkat kekritisan tertinggi dibandingkan komponen lain, yang mengindikasikan bahwa kebocoran Waterway PLTA merupakan mode kegagalan dengan urgensi penanganan paling tinggi karena menggabungkan frekuensi kemunculan yang tinggi, potensi dampak struktural yang serius, dan tingkat keyakinan data yang kuat. Hasil perhitungan tersebut dirangkum dalam Tabel 5, sementara Tabel 6 menampilkan tiga komponen yang menduduki skala prioritas tertinggi dan menjadi fokus analisis lanjutan

Tabel 5. Analisis FMECA

No	Komponen	Kemungkinan (P)	Konsekuensi (I)	Keyakinan (C)	Risiko (R) = (P) x (I)	Kekitrisan (Cr) = (R) x (C)
1	Tubuh Bendungan (Puncak)	3	4	4	12	48
2	Lereng Hulu Bendungan	3	2	2	6	12
3	Kaki Bendungan	1	2	2	2	4
4	*Spillway*	4	3	3	12	36
5	Kebocoran Water way PLTA	4	4	4	16	64
6	Waduk	4	3	1	12	12

Tabel 6. Ringkasan Urutan Prioritas Potensi Bahaya Bendungan Sutami

No	Komponen	Risiko		Kekritisan	Urutan		Tindakan
		Nilai	Deskripsi	Nilai	Risiko	Kekritisan	
1	Tubuh Bendungan (Puncak)	12	Sedang	48	4	2	**Dianalisis**
2	Lereng Hulu Bendungan	6	Rendah	12	2	4	Tidak Dianalisis
3	Kaki Bendungan	2	Tidak Berarti	4	1	5	Tidak Dianalisis
4	*Spillway*	12	Sedang	36	3	3	**Dianalisis**
5	Kebocoran Water way PLTA	16	Tinggi	64	5	1	**Dianalisis**
6	Waduk	12	Sedang	12	2	4	Tidak Dianalisis

3.3 Identifikasi Mode Kegagalan

Tingkat risiko dan kekritisan masing-masing komponen yang telah diperoleh dari analisis FMECA selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam perhitungan estimasi probabilitas kegagalan menggunakan Metode Pohon Kejadian (*Event Tree Analysis*), dengan hasil rekapitulasinya tersaji pada Tabel 7.

Tabel 7. Probabilitas Bahaya Bendungan Sutami

No	Komponen	Penyebab	Mode Kegagalan	*Ekstreme*	*High*	*Medium*	*Low*	*Normal*
1	Tubuh Bendungan Puncak	Terjadi Penurunan pada bagian tubuh bendungan	Memungkinkan air hujan masuk ke tubuh bendungan, sehingga akan merusak lapisan inti	3.65E-02	3.65E-02	0.00E+00	0.00E+00	8.27E-01

No	Komponen	Penyebab	Mode Kegagalan	*Ekstreme*	*High*	*Medium*	*Low*	*Normal*
2	*Spillway*	Terjadinya deformasi dibagian *Spillway* sehingga pondasi tumpuan menggantung	bendungan dan dapat mengganggu keamanan struktur bendungan Bocoran di bagian dinding retakan dinding *Spillway* serta stabilitas tumpuan jembatan yang terganggu	6.57E-04	1.62E-04	0.00E+00	0.00E+00	9.99E-01
3	Kebocoran Water way PLTA	Adanya tekanan pada saat melakukan pengambilan dan terjadinya pengikisan pada saat pengoperasian	Terjadinya kebocoran pada *Waterway* PLTA mengakibatkan kehilangan air yang kemudian mendorong masuknya aliran air ke dalam inti tubuh bendungan, kondisi ini secara progresif dapat memicu fenomena erosi internal yang membahayakan integritas struktural bendungan.	3.21E-02	3.36E-04	0.00E+00	0.00E+00	9.68E-01

3.4 Penilaian Risiko Metode Modifikasi ICOLD

Melalui serangkaian perhitungan terhadap seluruh parameter metode modifikasi ICOLD, diperoleh nilai indeks risiko Bendungan Sutami sebesar 67. Berdasarkan klasifikasi indeks risiko yang berlaku, nilai 67 berada pada rentang 46–75 sehingga Bendungan Sutami dikategorikan dalam kelas risiko "Tinggi" (*High*), yang mengindikasikan bahwa bendungan ini memerlukan perhatian khusus serta tindakan perbaikan dalam waktu yang tidak terlalu lama guna mencegah peningkatan potensi kegagalan. Rekapitulasi lengkap seluruh parameter dan hasil perhitungan analisis risiko metode modifikasi ICOLD pada Bendungan Sutami disajikan secara sistematis pada Tabel 8.

Tabel 8. Penilaian Risiko Bendungan Sutami Metode ICOLD

No	Faktor Pengaruh/Dampak	Kuantitas	Klasifikasi dan Nilai				Nilai Risiko
			Ekstrim	Tinggi	Sedang	Rendah	
1	Kapasitas Waduk (juta m3)	175	6				6

No	Faktor Pengaruh/Dampak	Kuantitas	Klasifikasi dan Nilai				Nilai Risiko
			Ekstrim	Tinggi	Sedang	Rendah	
2	Tinggi Bendungan (m)	100	6				6
3	Jumlah penduduk yang memerlukan evakuasi (jiwa)	996,490	12				12
4	Potensi kerusakan hiliir (terhadap struktur eksisting)	Ekstrim	18				18
	Sub total A		**42**	**0**	**0**	**0**	**42**
5	Parameter Tambahan pada Bendungan Eksisting						
a	Kelengkapan data konstruksi dan rekam jejak pemeliharaan	Tinggi	0				0
b	Pemantauan kinerja instrumentasi bendungan	Tinggi	0				0
c	Intensitas upaya pada kajian keamanan yang telah dilaksanakan sebelumnya	Tinggi	0				0
d	Pertumbuhan kawasan hilir yang telah terjadi maupun yang diproyeksikan	Rendah			1		1
	Sub total B		**0**	**0**	**1**	**0**	**1**
6	Parameter Tambahan dalam Penanganan Kelemahan Struktural Bendungan						
a	Kapasitas banjir terhadap dengan kegagalan	Tinggi		4			4
b	Ketahanan statik (stabilitas) struktur bendungan terhadap potensi keruntuhan	Tinggi		12			12
c	Resistensi struktur bendungan terhadap beban seismic (gempa)	Tinggi		8			8
	Sub total B		**0**	**24**	**0**	**0**	**24**
	Total						**67**
	Kelas Risiko						**Tinggi**

3.5 Evaluasi Risiko

Hasil analisis probabilitas kegagalan Bendungan Sutami menggunakan metode pohon kejadian, baik berdasarkan probabilitas ekstrim individu maupun probabilitas kelompok, menunjukkan bahwa nilai probabilitas risiko yang diperoleh melampaui ambang batas nilai risiko yang dapat diterima, sehingga dikategorikan "Tidak Memenuhi". Sejalan dengan hal tersebut, penilaian risiko menggunakan metode modifikasi ICOLD menghasilkan nilai indeks risiko sebesar 67, sehingga Bendungan Sutami tergolong dalam kategori risiko "Tinggi" (High). Kedua metode yang digunakan secara konsisten mengindikasikan perlunya tindakan lanjut dalam pengelolaan keamanan bendungan ini. Perlu dipahami bahwa hasil penilaian risiko yang dikategorikan "Tidak Memenuhi" maupun "Tinggi" tidak serta-merta mengimplikasikan bahwa bendungan berada dalam kondisi kritis atau akan segera mengalami kegagalan, melainkan merupakan instrumen evaluasi kuantitatif yang menjadi landasan ilmiah dalam penetapan skala prioritas pemeliharaan dan perbaikan bendungan secara terencana (Firmansyah & Sriyana, 2022). Pendekatan ini selaras dengan konsep *risk-informed decision making* yang dikemukakan oleh *(Federal Energy Regulatory Commission*, 2020), yang menegaskan bahwa hasil penilaian risiko semestinya digunakan untuk mengarahkan alokasi sumber daya dan prioritas tindakan, bukan sebagai indikator tunggal kelayakan operasional bendungan.

3.6 Rencana Tindakan Pengurangan Risiko

Merujuk pada hasil evaluasi risiko yang telah dilakukan menggunakan Metode Pohon Kejadian dan Metode Modifikasi ICOLD, Bendungan Sutami memperoleh kesimpulan "Tidak Memenuhi" pada analisis probabilitas serta nilai indeks risiko sebesar 67 yang tergolong dalam kategori "Tinggi". Kondisi ini mengindikasikan bahwa diperlukan serangkaian tindakan pengurangan risiko yang terstruktur dan terencana sebagai langkah mitigasi, sebagaimana diuraikan secara rinci pada Tabel 9.

Tabel 9. Status Tindakan Pengurangan Risiko dan Prioritas

Komponen	Kekritisan (Cr)	Jenis Inspeksi Lanjutan	Tindakan Perbaikan Teknis	Prioritas Waktu	Indikator Keberhasilan
Kebocoran *Waterway* PLTA	64 (Tinggi)	Inspeksi CCTV bawah air (*underwater inspection*) dan uji tekanan (*pressure test*) pada seluruh panjang *Waterway*; pemantauan debit rembesan piezometer terdekat setiap minggu	1. Penambalan/*grouting* lokal pada titik kebocoran teridentifikasi 2. Penggantian liner/pelapis *Waterway* sesuai rekomendasi laporan inspeksi besar 3. Pemasangan sistem deteksi kebocoran otomatis (*leak detection*)	Segera (0-6 bulan)	Debit rembesan turun ke ambang normal; tidak ada indikasi erosi internal pada pemantauan piezometer
Tubuh Bendungan (Puncak)	48 (Sedang–Tinggi)	Survei topografi deformasi puncak (*leveling*) dan inspeksi visual retakan aspal secara berkala	1. Perbaikan/pengaspalan ulang (*resealing*) pada retakan memanjang 2. Injeksi *grouting* pada rekahan yang berpotensi meloloskan air hujan ke tubuh bendungan 3. Perbaikan sistem drainase permukaan puncak	Jangka pendek (6-12 bulan)	Tidak ada perkembangan retakan baru; laju penurunan puncak dalam batas toleransi desain
Spillway	36 (Sedang)	Inspeksi struktural pada tumpuan jembatan *Spillway* dan uji NDT (*non-destructive test*) pada *joint chute*	1. Perbaikan/*grouting* pada retakan joint chute 2. Perkuatan pondasi tumpuan jembatan yang menggantung 3. Monitoring pergerakan struktur secara berkala	Jangka menengah (1-2 tahun)	Stabilitas tumpuan terjaga; tidak ada perkembangan retakan pada *joint chute*

Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian (Buldan et al., 2021) yang melakukan penilaian risiko pada Bendungan Kedungombo menggunakan metode tradisional dan metode pohon

kejadian, yang juga menunjukkan nilai probabilitas risiko yang tidak dapat diterima sehingga diperlukan upaya perbaikan sistematis. Keselarasan hasil antara kedua studi kasus ini memperkuat urgensi pelaksanaan tindakan pengurangan risiko sebagai bagian integral dari sistem manajemen keamanan bendungan, sekaligus menegaskan relevansi pendekatan *risk-informed dam safety management* yang kini menjadi praktik umum dalam pengelolaan keamanan bendungan modern (Yang et al., 2024).

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis probabilitas kegagalan menggunakan metode tradisional dan metode pohon kejadian (*Event Tree Analysis*), baik pada tingkat probabilitas ekstrim individu maupun probabilitas kelompok, diperoleh nilai probabilitas risiko pada komponen kritis Bendungan Sutami yang berkisar antara 1,00E-05 hingga 3,65E-02. Nilai ini melampaui ambang batas risiko yang dapat diterima, sehingga Bendungan Sutami dinyatakan "Tidak Memenuhi" dan memerlukan tindakan penanganan lebih lanjut. Hasil ini konsisten dengan penilaian risiko menggunakan metode modifikasi ICOLD yang menghasilkan nilai indeks risiko sebesar 67 dengan klasifikasi kategori "Tinggi" (*High*), yang menegaskan bahwa Bendungan Sutami termasuk bendungan yang memerlukan perhatian khusus serta langkah-langkah perbaikan konkret guna mereduksi tingkat risikonya. Hasil identifikasi FMECA menunjukkan bahwa komponen kebocoran *Waterway* PLTA memiliki tingkat kekritisan tertinggi (Cr = 64), yang disebabkan oleh kombinasi frekuensi kemunculan yang tinggi, potensi dampak erosi internal yang serius terhadap integritas struktural bendungan, serta tingkat keyakinan data pemantauan yang kuat. Sebagai tindak lanjut, dirumuskan rekomendasi pengurangan risiko yang disusun berdasarkan skala prioritas penanganan dan mencakup jenis inspeksi lanjutan, metode perbaikan teknis, serta prioritas waktu pelaksanaan yang mencakup tiga aspek utama: (1) perbaikan fisik terhadap komponen struktural yang teridentifikasi mengalami defisiensi; (2) investigasi khusus pada elemen yang memerlukan kajian teknis lebih mendalam; serta (3) peningkatan manajemen operasi dan pemeliharaan (OP) bendungan secara berkelanjutan. Rekomendasi ini bertujuan memulihkan fungsi optimal serta memperpanjang umur layan bendungan, sekaligus mencegah berkembangnya permasalahan yang dapat mengancam keamanan bendungan dan keselamatan masyarakat di kawasan hilir..

DAFTAR PUSTAKA

Buldan, R., Sriyana, I., & Suharyanto. (2021). PENILAIAN RISIKO KEGAGALAN BENDUNGAN KEDUNGOMBO SEBAGAI DASAR PRIORITAS PEMELIHARAAN BENDUNGAN. In Agustus (Vol. 4, Number 3).

Federal Energy Regulatory Commission. (2020). Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects: Chapter 1, Introduction to risk-informed decision making. https://ferc.gov

Firmansyah, R., & Sriyana, I. (2022). PENILAIAN RISIKO BENDUNGAN SAGULING DENGAN METODE TRADISIONAL, METODE POHON KEJADIAN DAN METODE MODIFIKASI ICOLD.

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), 886.

Herawanto, B., Suripin, & Wulandari, D. A. (2023). Dyah Ari Wulandari (3) Media Ilmiah Teknik Sipil (Vol. 11, Number 1).

ICOLD (International Commission on Large Dams). (2005). Risk assessment in dam safety management: A reconnaissance of benefits, methods and current applications. 130.

Indrawan, D. (2013). Penilaian Indeks Risiko Metode Modifikasi Andersen dan Modifikasi ICOLD untuk 12 Bendungan di Pulau Jawa. Jurnal Sumber Daya Air, 9(2), 93–104.

Ismijayanti, D., Kodoatie, R. J., & Edhisono, S. (2023). Penilaian Risiko Bendungan Manggar Dengan Metode Modifikasi ICOLD: Risk Assessment Manggar Dam With Modification ICOLD Method. Media Ilmiah Teknik Sipil, 11(3), 176–182.

Kementerian PUPR. (2011). Pedoman Teknis Penilaian Resiko Bendungan. Jakarta.

Mulyono, J. (2017). Konsepsi keamanan bendungan dalam pembangunan dan pengelolaan bendungan. Jurnal Infrastruktur, 3(1), 1–62.

Perum Jasa Tirta I. (2016). Pemeriksaan Besar Bendungan Sutami.

Robert J. Kodoati. (2018). Analisis Risiko Keamanan Bendungan Berbasis Instrumentasi: 6 (2). Media Ilmiah Teknik Sipil.

Soentoro, E. A. , P. A. B. , & S. S. H. (2013). Study on Dam Risk Assessment as a Decision-Making Tool to Assist Prioritizing Maintenance of Embankment Dam in Indonesia.

Suprapto, 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.

United States Bureau of Reclamation, & United States Army Corps of Engineers. (2019). Best practices in dam and levee safety risk analysis: Chapter A5, Event trees. https://usbr.gov

Yang, D., Wu, J., Guo, Z., Zeng, X., & Zhang, Q. (2024). Safety risk assessment of reservoir dam structure: an empirical study in China. Scientific Reports, 14(1), 20232. https://doi.org/10.1038/s41598-024-71156-1