

Analisis Probabilitas Kegagalan Bendungan Pacal Menggunakan Metode *Event Tree Analysis*

Andreas R. ^{*1}, Suripin¹, Ignatius Sriyana¹, Suprpto¹

¹Departemen Teknik Sipil, Universitas Diponegoro, Semarang
e-mail: *andreanjuanizar@gmail.com

Received 15 June 2022; Reviewed 08 August 2022; Accepted 30 August 2022

Journal Homepage: <http://jurnal.borneo.ac.id/index.php/borneoengineering>

Doi: <https://doi.org/10.35334/be.v1i2.2652>

Abstract

Dam failure is a catastrophic event which may cause great loss and fatalities. Risk assessment of a dam is needed to be done to give an understanding of the probable upcoming failure. In this study, the value of Annualized Failure Probability (AFP) in Pacal Dam, located at Bojonegoro Regency, is calculated. The analysis is done by inventorying all failure modes that will probably occur based on the inspection report of the dam. The FMECA analysis is done to each potential danger. All dangers possessed the highest value of risk and critical value then to be analyzed using event tree analysis in order to obtain the detailed process of the failure. Result shows the AFP of Pacal Dam is $1,29 \times 10^{-5}$. The highest risk is the potential danger due to dam deformation. Risk status of Pacal Dam is at "the tolerable acceptance of an existing dam". In order to reduce the risk of the dam failure, it is recommended to do a more detailed deformation analysis and to cure the crack in the concrete membrane of the dam to prevent the enlargement.

Keywords: risk assessment, dam failure probability, event tree, Pacal Dam

Abstrak

Kegagalan bendungan merupakan suatu bencana besar yang dapat menimbulkan kerugian besar dan dapat menimbulkan korban jiwa. Usaha dalam mengidentifikasi kemungkinan kegagalan bendungan dapat dilakukan dengan analisis risiko kegagalan bendungan. Pada penelitian ini, dilakukan analisis risiko untuk menentukan nilai probabilitas kegagalan tahunan pada Bendungan Pacal yang terletak di Kabupaten Bojonegoro. Analisis dilakukan dengan menginventarisasi seluruh mode kegagalan yang mungkin terjadi berdasarkan laporan inspeksi besar yang dilaksanakan di bendungan. Setiap potensi bahaya yang ada dilakukan perhitungan perkiraan risiko dengan menggunakan metode FMECA. Terhadap seluruh potensi bahaya yang memiliki nilai risiko dan kekritisan yang tinggi, dilakukan analisis risiko menggunakan metode pohon kejadian (*event tree*) sehingga diketahui proses kejadian yang mungkin terjadi. Hasil analisis yaitu probabilitas kumulatif dari beberapa potensi bahaya kegagalan Bendungan Pacal adalah sebesar: $1,29 \times 10^{-5}$. Probabilitas kegagalan bendungan tertinggi yaitu pada potensi bahaya deformasi tubuh bendungan. Status risiko Bendungan Pacal berada dalam "batas yang ditoleransi untuk bendungan eksisting". Untuk mengurangi risiko bahaya kegagalan bendungan, direkomendasikan untuk dilakukan analisis deformasi lebih lanjut dan dilakukan penanganan pada keretakan pada plat beton untuk menghindari terjadinya perluasan keretakan.

Kata kunci: analisis risiko, probabilitas kegagalan bendungan, event tree, Bendungan Pacal

1. Pendahuluan

Kegagalan bendungan dapat menyebabkan bencana besar di hilir sungai, termasuk hilangnya nyawa dan kerusakan harta benda. Pemeliharaan bendungan merupakan kegiatan yang sangat penting untuk memastikan keamanan bendungan tetap terjaga dengan baik, dan dapat dioperasikan secara normal untuk memberikan manfaat selama umur efektif bendungan (Soentoro, dkk., 2013). Upaya pencegahan kegagalan bendungan dilakukan berdasarkan konsepsi keamanan bendungan yaitu: (1) keamanan struktural; (2) operasi, pemeliharaan, dan pemantauan; dan (3) kesiapsiagaan tindak darurat (Kementerian PUPR, 2015). Analisis mode kegagalan merupakan faktor penting dalam mengidentifikasi potensi risiko (Coccon et al., 2017). Risiko merupakan kombinasi dari tiga aspek, yaitu: apa yang dapat terjadi, seberapa mungkin hal tersebut dapat terjadi, dan apa saja konsekuensi yang timbul akibat kejadian tersebut (Kaplan, 1997).

Faktor risiko kegagalan bendungan dapat diidentifikasi sedini mungkin dengan melakukan inspeksi pada bendungan secara rutin. Penilaian risiko terdiri dari analisis dan evaluasi risiko dan dapat digunakan dalam efisiensi untuk penentuan prioritas pemeliharaan bendungan dalam keterbatasan anggaran (Suprpto dkk., 2021). Penilaian risiko pada saat ini dan prediksi terhadap risiko di masa depan merupakan aspek penting dalam manajemen keamanan bendungan. Penilaian risiko sangat terkait dengan metode probabilistik. Pengamatan lapangan yang baik dibutuhkan dalam pengembangan kerangka kerja yang komprehensif untuk pengelolaan keamanan bendungan (Hariri-Ardebili, 2018).

Penilaian risiko adalah proses pengambilan keputusan dengan memerhatikan apakah risiko yang ada dapat ditoleransi dan tindakan pengendalian risiko yang ada sudah memadai, dan jika tidak, dilakukan penilaian apakah alternatif pengendalian risiko harus diterapkan. Penilaian risiko menggabungkan antara analisis risiko dan evaluasi risiko. Toleransi terhadap risiko salah satunya dapat dinilai dengan menggunakan kurva f-N (Gardoni & Murphy, 2014). Kurva f-N menjelaskan keterkaitan antara probabilitas kegagalan tahunan (f) dan perkiraan kehilangan nyawa/jumlah jiwa terdampak akibat kegagalan bendungan (N) (Hariri-Ardebili, 2018). Penilaian risiko secara probabilistik merupakan instrumen yang efektif dalam analisis keamanan struktur (Cho dkk., 2011). Analisis risiko berguna untuk membantu pemangku kepentingan dalam mengambil keputusan berdasarkan informasi risiko. Penilaian risiko dapat memudahkan dalam proses memahami adanya ketidakpastian pada struktur yang kritis, dapat digunakan dalam proses identifikasi bahaya, membantu mengevaluasi respon oleh sistem dan kerentanan yang terkait dengan setiap bahaya yang ada, serta menilai efektivitas tindakan pengurangan risiko yang dilakukan (Morales-Torres dkk., 2019)

Pohon kejadian adalah sebuah representasi berupa model logika yang mencakup semua kemungkinan rantai kejadian yang dihasilkan oleh suatu peristiwa awal yang dapat menghasilkan kegagalan struktur bendungan (Morales-Torres et al., 2019). Penggunaan model pohon kejadian (*event tree*) dalam analisis risiko banyak digunakan karena dapat menganalisis banyak mode kegagalan bendungan sekaligus memperhitungkan probabilitas kegagalan dan konsekuensi yang timbul akibat kegagalan tersebut (SPANCOLD, 2012; USBR, 2015). Analisis pohon kejadian (*event tree analysis*) adalah metode logika, yang dapat berupa kualitatif maupun kuantitatif, yang digunakan untuk mengidentifikasi beberapa kemungkinan hasil akibat suatu kejadian. Penerapan metode pohon kejadian (*event tree*) dalam keamanan bendungan yaitu mengidentifikasi perkiraan kegagalan sehingga dapat digambarkan bagaimana berbagai kejadian dapat terjadi dan bagaimana skenario selanjutnya berkembang (Baecher, 2016). Analisis risiko kegagalan bendungan dengan metode pohon kejadian (*event tree*) dapat menggambarkan keseluruhan proses perubahan yang terjadi pada bendungan dan mengidentifikasi kemungkinan kecelakaan sebelum terjadi, serta dapat digunakan

dalam pengambilan tindakan untuk mengurangi kegagalan secara efektif. Berdasarkan frekuensi kejadian masing-masing faktor risiko, kemungkinan kegagalan pada bendungan dapat dihitung (Fudk., 2018)

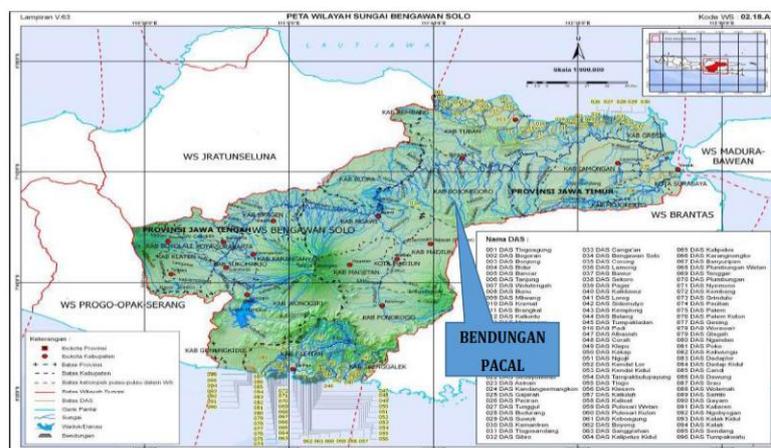
Bendungan Pacal merupakan struktur yang dibangun sejak tahun 1924 dan memiliki usia layanan yang cukup tua. Pada saat ini, kondisi Bendungan Pacal mengalami beberapa masalah pada komponennya, antara lain: adanya *displacement* pada lereng hilir bendungan, terdapat retak pada plat beton, adanya penurunan pada bagian *rip-rap*, dan yang lainnya. Kondisi bendungan yang cukup tua dan mempertimbangkan bahaya di daerah hilir, penting untuk dilakukan analisis risiko untuk dapat mengidentifikasi potensi bahaya dan menentukan probabilitas kegagalan bendungan.

Rumusan masalah pada penelitian ini yaitu perlunya dilakukan analisis risiko kegagalan bendungan berdasarkan kegiatan inspeksi rutin untuk memastikan bahwa keamanan bendungan dalam status yang masih aman.

Maksud dari penelitian ini yaitu untuk memetakan potensi bahaya pada Bendungan Pacal untuk ditentukan strategi dalam pengendalian risiko atas potensi bahaya tersebut. Hasil analisis risiko kegagalan Bendungan Pacal dapat digunakan sebagai pertimbangan oleh pengelola bendungan dalam usaha pemeliharaan bendungan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada Bendungan Pacal yang terletak di Desa Kedungsumber, Kecamatan Temayang, Kabupaten Bojonegoro, Provinsi Jawa Timur. Letak geografis Bendungan Pacal terletak pada $111^{\circ} 52' 14,75''$ BT dan $7^{\circ} 21' 44,75''$ LS. Lokasi Bendungan Pacal ditunjukkan pada Gambar 1.

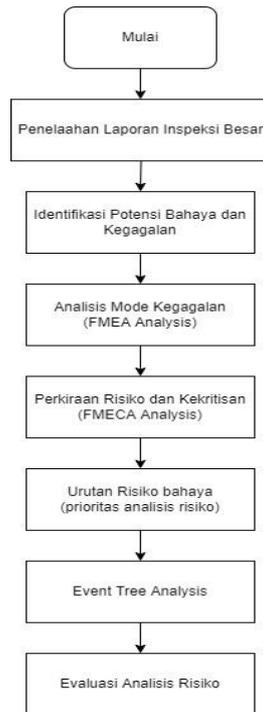


Gambar 1. Lokasi Bendungan Pacal (Sumber: BBWS Bengawan Solo, 2019)

Penelitian ini meliputi analisis risiko keamanan Bendungan Pacal dengan menggunakan metode pohon kejadian (*event tree analysis*) untuk mendapatkan nilai probabilitas tahunan kegagalan bendungan. Data yang digunakan dalam analisis ini yaitu dokumen Laporan Inspeksi Bendungan Pacal yang diperoleh dari Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo. Hasil inspeksi kemudian digunakan untuk mengidentifikasi potensi bahaya dan mode kegagalan yang mungkin terjadi. Selanjutnya dilakukan perkiraan risiko bahaya dan kekritisannya dengan menggunakan analisis FMECA dan dilakukan pengurutan risiko bahaya dengan sistem *ranking*. Prioritas analisis risiko terhadap potensi bahaya dan mode kegagalan bendungan dilanjutkan dengan analisis risiko dengan

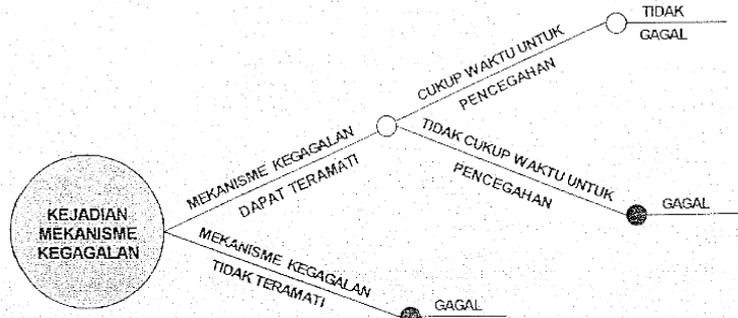
menggunakan metode pohon kejadian (*event tree analysis*). Potensi risiko yang ditemukan kemudian dilakukan evaluasi untuk direncanakan tindak lanjutnya dalam evaluasi risiko. Bagan alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.

Mekanisme kegagalan bendungan perlu diuraikan dalam elemen-elemennya dengan menggunakan skema logika, seperti pohon kejadian (*event tree*) dan pohon kesalahan (*fault tree*). Dalam analisis kuantitatif, penguraian ini akan mempermudah dalam memperkirakan probabilitas kegagalan bersyarat. Setiap penggambaran proses kegagalan berupa pohon kejadian (*event tree*) atau pohon kesalahan (*fault tree*) agar dipastikan secara logika adalah benar. Penggambaran untuk proses kegagalan ditunjukkan melalui Gambar 3.



Gambar 2. Bagan Alir Proses Penelitian

Untuk memperkirakan besarnya probabilitas tanggap (*response probabilities*) pada tiap titik simpul pohon kejadian (*event tree*) apabila tidak ada dasar (berupa informasi statistik yang memadai) dapat dilakukan dengan menggunakan skema pemetaan probabilitas (*probability mapping schemes*) dimana perkiraan probabilitas digunakan kata dan angka atau deskripsi verbal (*verbal descriptor*) untuk kemungkinan. Skema pemetaan probabilitas dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 3. Diagram Mekanisme Kegagalan dan Tindakan Pencegahan

(Sumber: Dwi dkk., 2016)

Tabel 1. Skema Pemetaan Probabilitas

Deskripsi Keadaan atau Kejadian	Urutan Penetapan Besaran Probabilitas
Kejadian pasti terjadi	1
Kejadian atau peristiwa teramati dalam <i>data base</i>	0,1
Kejadian atau peristiwa tidak teramati, atau teramati pada satu kejadian kecil dalam data base yang 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 dan Perumahan Rakyat (2011)

Perkiraan risiko dan kekritisan potensi bahaya menggunakan analisis FMECA dilakukan dengan melakukan penilaian terhadap potensi bahaya. Masing-masing potensi bahaya dilakukan asesmen terhadap besaran nilai kemungkinan (P), nilai konsekuensi (I), dan keyakinan (C). Ketiga nilai tersebut dapat diperkirakan dengan menggunakan kriteria nilai risiko (R). Kriteria nilai risiko pada analisis FMECA dapat dilihat pada Gambar 4.

		Risiko (R) = (P) x (I)				
		Kemungkinan (P)				
		Sangat Rendah	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi
		1	2	3	4	5
Konsekuensi (I)	Sangat Tinggi	5	10	15	20	25
	Tinggi	4	8	12	16	20
	Sedang	3	6	9	12	15
	Rendah	2	4	6	8	10
	Sangat Rendah	1	2	3	4	5

Gambar 4. Nilai Risiko pada Analisis FMECA

(Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2011)

3. Hasil dan Pembahasan

Identifikasi potensi bahaya pada Bendungan Pacal berdasarkan hasil inventarisasi temuan pengamatan di lapangan pada Laporan Inspeksi Besar Waduk Pacal dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Identifikasi Potensi Bahaya Bendungan Pacal (BBWS Bengawan Solo, 2019)

Komponen	Identifikasi Sumber Bahaya	Penyebab	Mode Kegagalan
Tubuh bendungan	Adanya displacement sebesar 30cm pada lereng hilir (secara visual dan hasil pengukuran)	Telah terjadi deformasi pada tubuh bendungan.	Keretakan dapat menjadi lebih besar dan dapat menimbulkan potensi keruntuhan.
Plat Beton	Ditemukan retak rambut pada blok 2, 4, 5, 7, 9 dengan pola bersambung hingga ke parapet.	Ada potensi pengelupasan pada bagian beton sehingga terjadi retak-retak halus.	Pembesaran keretakan dan menimbulkan kebocoran.
Rip-rap	Ditemukan tanda-tanda penurunan, pada lereng hilir ditemukan retakan.	Telah terjadi deformasi pada tubuh bendungan. Terjadinya pelapukan pada rip-rap	Penurunan dapat memicu keruntuhan.
Instrumentasi	Tidak dapat dilakukan evaluasi pergerakan tubuh bendungan, baik pergerakan vertical maupun horizontal	Tidak adanya inklinometer, ekstensometer, pemantauan gempa, dan <i>observation well</i> , sehingga tidak dilaksanakan pengukuran.	Tidak terpantaunya deformasi pada bendungan akan mengakibatkan ketidaksiapan saat bendungan mencapai deformasi diatas ambang batas. Keruntuhan bendungan dapat terjadi tiba-tiba tanpa disadari.
Bangunan Pengeluaran	Terjadi longsor pada lereng tanah bagian kiri dan kanan saluran pembawa di hilir outlet	Jenis tanah merupakan jenis rawan longsor.	Longsor pada lereng dapat menutupi saluran dan mengakibatkan sumbatan pada saluran pengeluaran. Berpotensi tidak teralirkannya debit banjir dan dapat terjadi overtopping.
Bangunan Intake	Terdapat pengelupasan pada permukaan selimut beton sampai ke hilir	Dicurigai terdapat erosi pada conduit.	Pengelupasan permukaan yang terus membesar akan mengakibatkan proteksi terhadap conduit menjadi hilang.
Waduk	Pada waduk terdapat polusi sampah kayu	Sampah kayu merupakan konsekuensi dari keberadaan hutan di sekitar waduk.	Berkurangnya kapasitas tampungan. Pada keadaan banjir, dapat terbawa menuju spillway dan berpotensi menghambat aliran outflow. Dapat terjadi overtopping.

Komponen	Identifikasi Sumber Bahaya	Penyebab	Mode Kegagalan
Peralatan Pendukung	Genset mati, tidak ada suku cadang	Tidak dilaksanakan pemeliharaan.	Tidak dapat beroperasinya peralatan yang berhubungan dengan kelistrikan karena tidak adanya backup.

Potensi bahaya yang telah diidentifikasi kemudian dianalisis kekritisannya menggunakan metode FMECA. Hasil analisis FMECA pada potensi bahaya di Bendungan Pacal dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Analisis FMECA Potensi Bahaya Bendungan Pacal

Komponen	Kondisi Beban	Potensi Bahaya	(P)	(I)	(C)	(R) = (P) x (I)	(Cr) = (R) x (C)
Tubuh bendungan	Normal	Adanya <i>displacement</i> sebesar 30cm pada lereng hilir (secara visual dan hasil pengukuran)	3	5	2	15	30
Plat Beton	Normal	Ditemukan retak rambut pada blok 2, 4, 5, 7, 9 dengan pola bersambung hingga ke parapet.	2	3	2	6	12
Rip-rap	Normal	Ditemukan tanda-tanda penurunan, pada lereng hilir ditemukan retakan.	2	3	2	6	12
Instrumentasi	Normal	Tidak dapat dilakukan evaluasi pergerakan tubuh bendungan, baik pergerakan vertical maupun horizontal	3	5	2	15	30
Bangunan Pengeluaran	Normal	Terjadi longsor pada lereng tanah bagian kiri dan kanan saluran pembawa di hilir outlet	3	4	3	12	36
Bangunan Intake	Normal	Terdapat pengelupasan pada permukaan selimut beton sampai ke hilir.	3	3	2	9	18
Waduk	Normal	Pada waduk terdapat polusi sampah kayu	2	3	2	6	12
Peralatan Pendukung	Normal	Genset mati, tidak ada suku cadang.	2	2	2	4	8

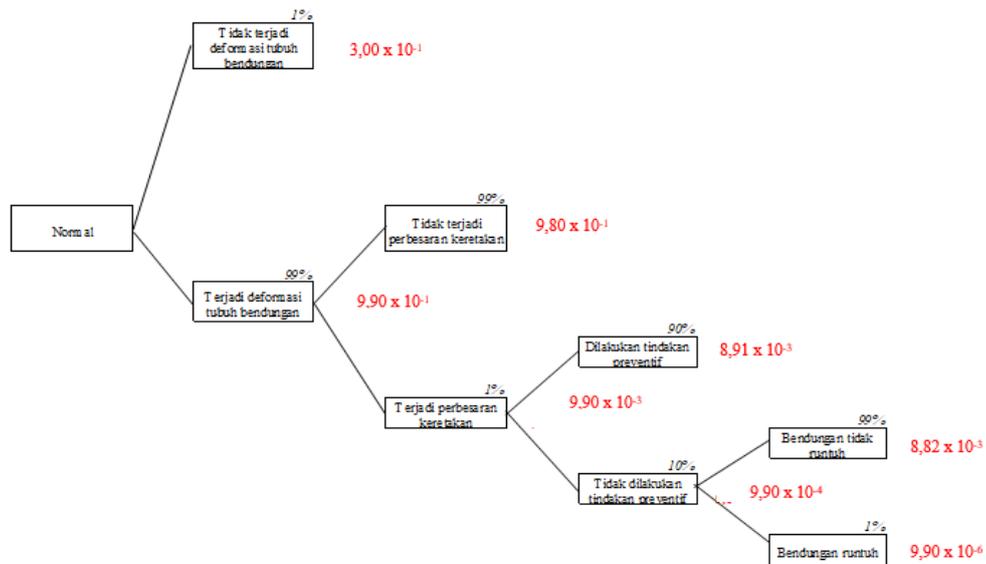
Proses analisis risiko terhadap potensi bahaya yang telah diidentifikasi dilakukan berdasarkan urutan prioritas risiko bahaya. Untuk menentukan potensi bahaya yang dilanjutkan ke tahap analisis risiko, dilakukan pengurutan prioritas risiko bahaya. Urutan risiko bahaya pada Bendungan Pacal dapat dilihat pada Tabel 4.

Berdasarkan urutan risiko potensi bahaya, dilakukan analisis terhadap potensi bahaya pada urutan kesatu sampai dengan keempat pada urutan berdasarkan nilai risiko dan urutan berdasarkan nilai kekritisan. Potensi bahaya yang akan dianalisis risiko yaitu: (1) Adanya *displacement* sebesar 30cm pada lereng hilir (secara visual dan hasil pengukuran), (2) Tidak dapat dilakukan evaluasi pergerakan tubuh bendungan, baik pergerakan vertikal maupun horizontal, (3) Terjadi longsor pada lereng tanah bagian kiri dan kanan saluran pembawa di hilir outlet, dan (4) Terdapat pengelupasan pada permukaan selimut beton sampai ke hilir.

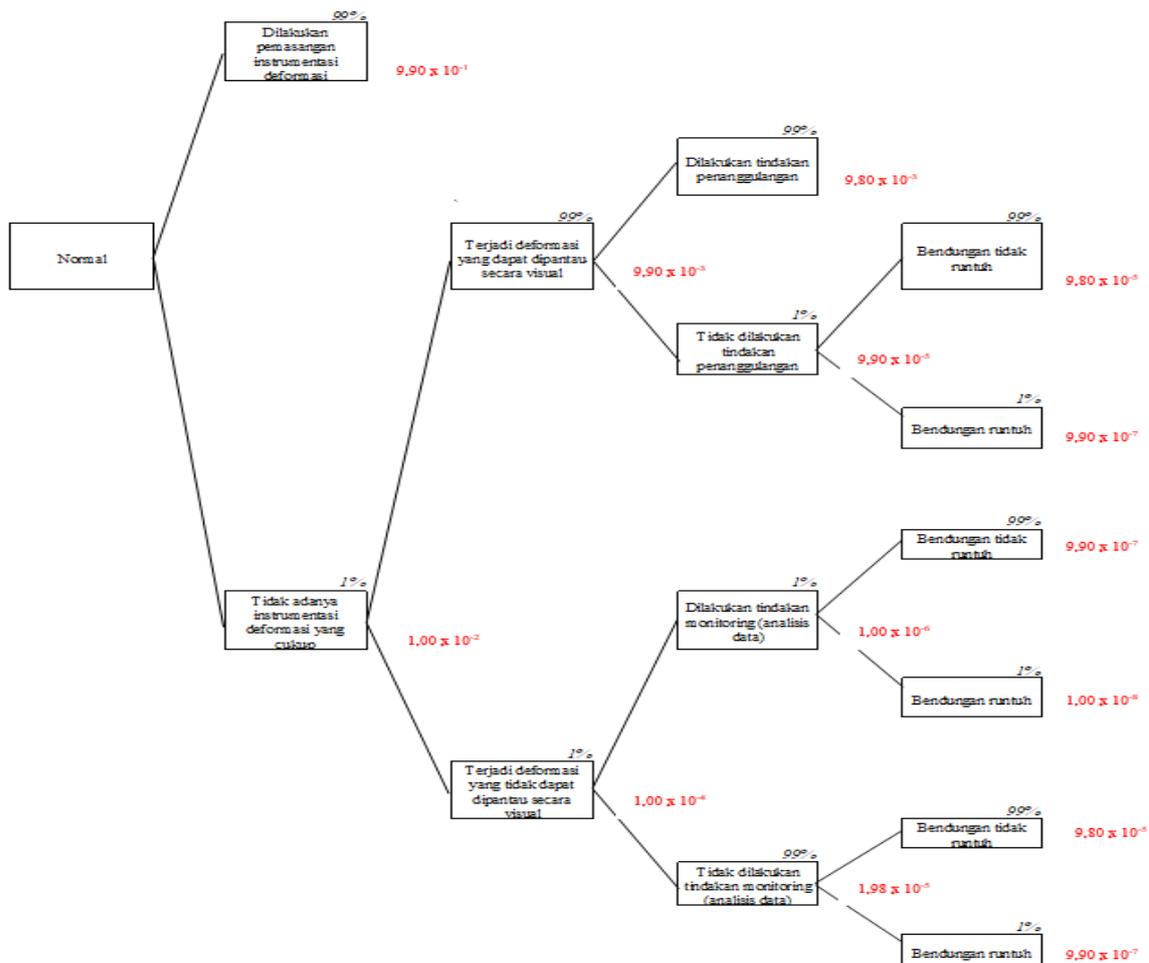
Tabel 4. Urutan Risiko Potensi Bahaya Bendungan Pacal

Potensi Bahaya	Risiko	Kekritisan	Urutan		Tindakan Analisis
	Nilai	Nilai	Risiko	Kekritisan	
Adanya <i>displacement</i> sebesar 30cm pada lereng hilir (secara visual dan hasil pengukuran)	15	30	1	2	Dianalisis
Ditemukan retak rambut pada blok 2, 4, 5, 7, 9 dengan pola bersambung hingga ke parapet.	6	12	5	5	Tidak Dianalisis
Ditemukan tanda-tanda penurunan, pada lereng hilir ditemukan retakan.	6	12	5	5	Tidak Dianalisis
Tidak dapat dilakukan evaluasi pergerakan tubuh bendungan, baik pergerakan vertical maupun horizontal	15	30	1	2	Dianalisis
Terjadi longsor pada lereng tanah bagian kiri dan kanan saluran pembawa di hilir outlet	12	36	3	1	Dianalisis
Terdapat pengelupasan pada permukaan selimut beton sampai ke hilir.	9	18	4	4	Dianalisis
Pada waduk terdapat polusi sampah kayu	6	12	5	5	Tidak Dianalisis
Genset mati, tidak ada suku cadang.	4	8	8	8	Tidak Dianalisis

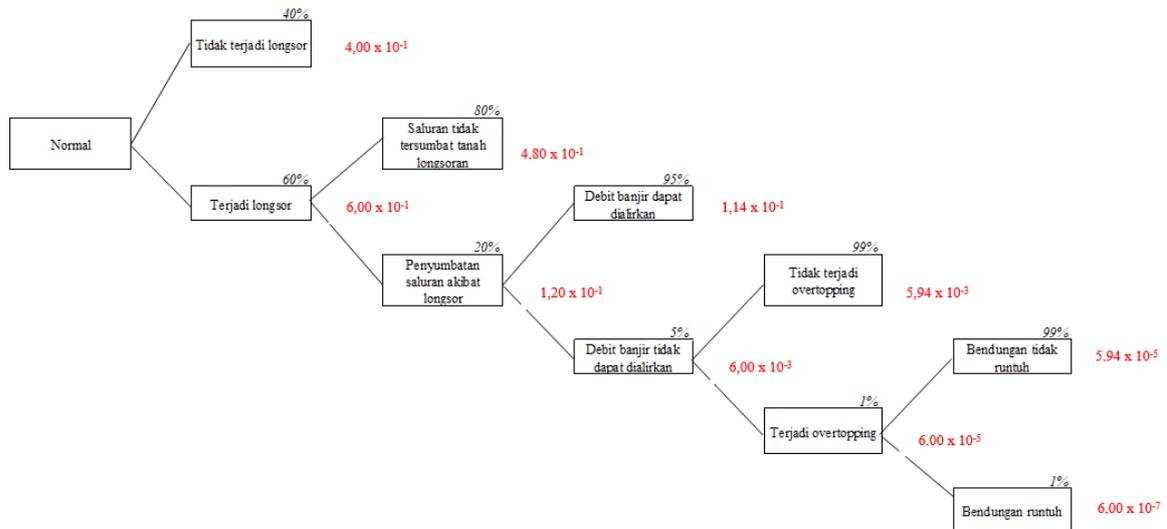
Analisis risiko bahaya dilakukan dengan menggunakan metode pohon kejadian (*event tree analysis*). Penilaian probabilitas terhadap potensi kegagalan bendungan dihitung dengan melakukan analisis terhadap keempat potensi bahaya yang termasuk dalam prioritas. Hasil analisis risiko probabilitas kegagalan Bendungan Pacal dapat dilihat pada Gambar 5 sampai dengan Gambar 8.



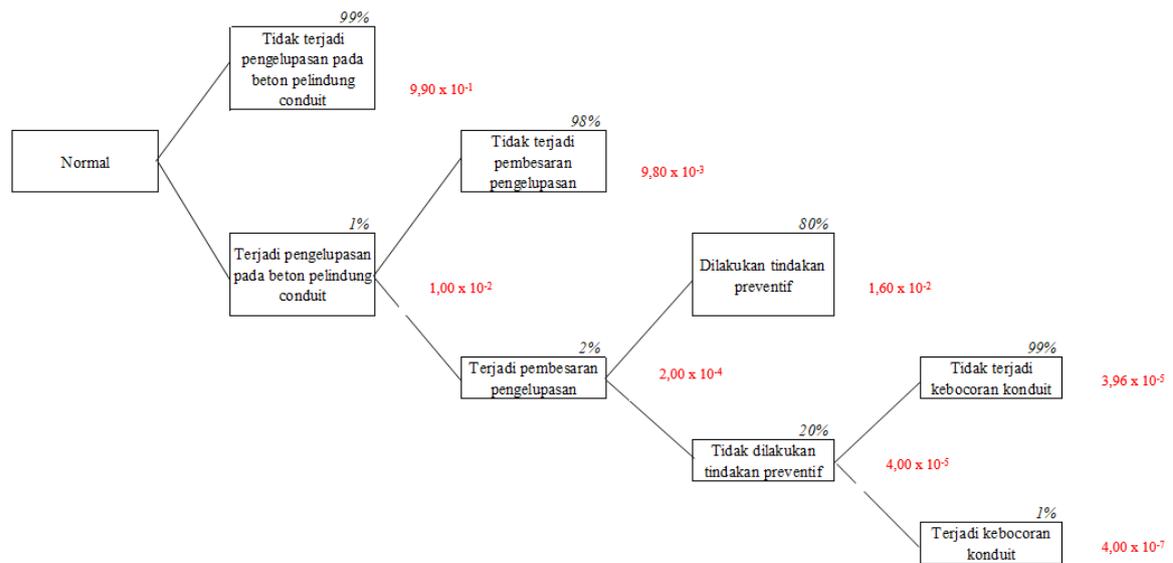
Gambar 5. Analisis Pohon Kejadian pada Potensi Bahaya Deformasi Tubuh Bendungan



Gambar 6. Analisis Pohon Kejadian pada Potensi Bahaya Tidak Adanya Instrumentasi Deformasi



Gambar 7. Analisis Pohon Kejadian pada Potensi Bahaya Terjadinya Longsor pada Lereng di Saluran Outlet



Gambar 8. Analisis Pohon Kejadian pada Potensi Bahaya Terjadinya Pengelupasan pada Pelindung Saluran Conduit

Hasil analisis pohon kejadian (*event tree analysis*) terhadap seluruh potensi bahaya kemudian dilakukan perhitungan probabilitas kegagalan bendungan. Probabilitas kegagalan Bendungan Pacal dapat dilihat pada Tabel 5.

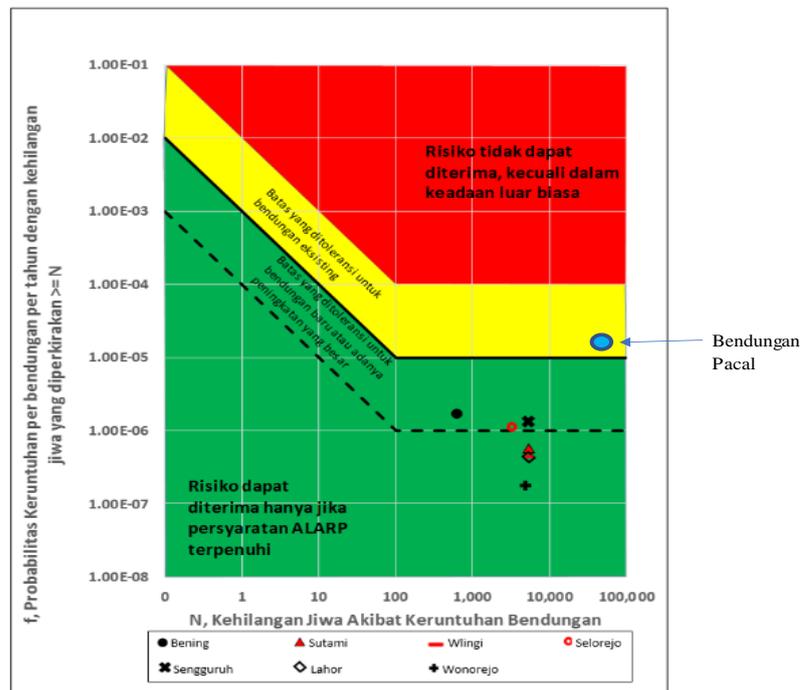
Tabel 5. Probabilitas Kegagalan Bendungan Pacal

Potensi Bahaya	Extreme	High	Medium	Low	Normal
Deformasi tubuh bendungan	$9,90 \times 10^{-6}$	$1,87 \times 10^{-2}$	$9,99 \times 10^{-1}$	$9,91 \times 10^{-1}$	0.00

Tidak cukupnya instrumen deformasi	$1,99 \times 10^{-6}$	1,00	0,00	$1,99 \times 10^{-4}$	$1,99 \times 10^{-2}$
Longsor pada saluran outlet	$6,00 \times 10^{-7}$	$1,19 \times 10^{-4}$	$7,26 \times 10^{-1}$	$6,00 \times 10^{-1}$	$4,00 \times 10^{-1}$
Kerusakan beton pelindung conduit	$4,00 \times 10^{-7}$	$1,02 \times 10^{-2}$	$1,60 \times 10^{-2}$	1,00	0,00
Probabilitas Tahunan	$1,29 \times 10^{-5}$	1,03	1,74	2,59	$4,2 \times 10^{-1}$

Berdasarkan Tabel 5, probabilitas kumulatif dari beberapa potensi bahaya kegagalan Bendungan Pacal adalah sebesar: $1,29 \times 10^{-5}$. Probabilitas kegagalan bendungan tertinggi yaitu pada potensi bahaya deformasi tubuh bendungan, sementara probabilitas kegagalan bendungan paling rendah yaitu pada potensi bahaya kerusakan beton pelindung conduit.

Penentuan status risiko Bendungan Pacal dilakukan dengan menggunakan grafik Hubungan f-N. Grafik tersebut digunakan untuk menentukan status risiko dengan menghubungkan probabilitas kegagalan bendungan per tahun dengan jumlah kehilangan jiwa akibat keruntuhan bendungan. Jumlah jiwa yang berada pada daerah terdampak jika terjadi keruntuhan Bendungan Pacal yaitu sebanyak 84.000 jiwa (BBWS Bengawan Solo, 2019). Penentuan status risiko Bendungan Pacal dengan grafik f-N berada dalam "batas yang ditoleransi untuk bendungan eksisting" sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Status Risiko Bendungan Pacal

Berdasarkan hasil analisis risiko kegagalan bendungan, Bendungan Pacal masih berada dalam batas aman. Untuk meningkatkan keamanan bendungan terhadap kegagalan, potensi bahaya yang teridentifikasi sebaiknya dilakukan tindakan pengurangan risiko. Tindakan pengurangan risiko yang direkomendasikan dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Rekomendasi dalam Pengurangan Risiko

Potensi Bahaya	Tindakan Penanganan Risiko
1. Adanya <i>displacement</i> sebesar 30cm pada lereng hilir (secara visual dan hasil pengukuran) 2. Tidak dapat dilakukan evaluasi pergerakan tubuh bendungan, baik pergerakan vertikal maupun horizontal	Perlu dilakukan analisis deformasi lebih lanjut untuk mengetahui kondisi deformasi yang terjadi. Perlu penanganan pada keretakan yang terjadi di lereng maupun pada plat beton (membran) agar keretakan tidak semakin membesar.
Terjadi longsor pada lereng tanah bagian kiri dan kanan saluran pembawa di hilir outlet	Perlu dilakukan pekerjaan perbaikan tanah agar longsor tidak terjadi terus menerus.
Terdapat pengelupasan pada permukaan selimut beton sampai ke hilir.	Perlu dilakukan rehabilitasi dan perkuatan pada lapisan pelindung conduit.

4. Kesimpulan

Analisis risiko kegagalan bendungan pada Bendungan Pacal dilakukan dengan menggunakan hasil pengamatan di lapangan yang termuat dalam dokumen Laporan Inspeksi Besar Bendungan Pacal. Berdasarkan analisis menggunakan metode pohon kejadian (*event tree analysis*) diketahui probabilitas kegagalan tahunan Bendungan Pacal sebesar $1,29 \times 10^{-5}$ dimana potensi bahaya yaitu deformasi yang terjadi pada tubuh bendungan. Berdasarkan probabilitas kegagalan tahunan bendungan dan perkiraan jumlah jiwa yang terdampak akibat kegagalan bendungan, diperoleh status risiko Bendungan Pacal yaitu berada dalam "batas yang ditoleransi untuk bendungan eksisting". Untuk mengurangi risiko bahaya kegagalan bendungan, direkomendasikan untuk dilakukan analisis deformasi lebih lanjut dan dilakukan penanganan pada keretakan pada plat beton untuk menghindari terjadinya perluasan keretakan. Analisis risiko perlu dilakukan secara berkala sesuai dengan perkembangan temuan hasil pengamatan di lapangan yang menimbulkan potensi bahaya yang ditemukan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat dan Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo Direktorat Jenderal Sumber Daya Air dan Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro atas dukungan data dan pembahasan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan.

Daftar Pustaka

- Baecher, G. B. (2016). Uncertainty in dam safety risk analysis. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 10(2), 92–108. <https://doi.org/10.1080/17499518.2015.1102293>
- BBWS Bengawan Solo. 2019. Laporan Inspeksi Besar Waduk Pacal. Surakarta
- Cho, T., Lee, J.-B., & Kim, S.-S. (2011). Probabilistic risk assessment for the construction phases of a PSC box girder railway bridge system with six sigma methodology. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(1), 119–130. <https://doi.org/10.1007/s12205-011-0675-1>
- Coccon, M. N., Song, J., Ok, S.-Y., & Galvanetto, U. (2017). A new approach to system reliability analysis of offshore structures using dominant failure modes identified by selective searching technique. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(6), 2360–2372. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-1192-z>

- Dwi Y., C., Juwono, P. T., & Yuliani, E. (2016). Analisis Probabilitas Risiko Kegagalan Bendungan Gerogkak Berdasarkan Metode Pohon Kejadian (*Event Tree*). *Jurnal Teknik Pengairan*, 7, 7-16.
- 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. <https://doi.org/10.3390/ijerph15050886>
- Gardoni, P., & Murphy, C. (2014). A Scale of Risk. *Risk Analysis*, 34(7), 1208–1227. <https://doi.org/10.1111/risa.12150>
- Hariri-Ardebili, M. A. (2018). Risk, Reliability, Resilience (R3) and beyond in dam engineering: A state-of-the-art review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 806–831. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.07.024>
- Kaplan S. 1997. The words of risk analysis. 17(4):407–17
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2011. Pedoman Teknis Penilaian Risiko. Jakarta
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2015. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 27/PRT/M/2015 tentang Bendungan. Jakarta
- Morales-Torres, A., Escuder-Bueno, I., Serrano-Lombillo, A., & Castillo Rodríguez, J. T. (2019). Dealing with epistemic uncertainty in risk-informed decision making for dam safety management. *Reliability Engineering & System Safety*, 191, 106562. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.106562>
- Soentoro, Edy A., Purnomo, Arie B., & Susantin, Sri H. 2013. Study on Dam Risk Assessment as a Decision-Making Tool to Assist Prioritizing Maintenance of Embankment Dam in Indonesia. The Secind International Conference on Sustainable Infratructure and Built Environment. Bandung 19-20 November 2013. ISBN 978-979-98278-4-5
- SPANCOLD. 2012. Risk analysis as applied to dam safety. Technical guide on operation of dams and reservoirs vol. 1. Madrid: Professional Association of Civil Engineers. Spanish National Committee on Large Dams. Madrid
- 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>
- USBR. 2015. Best practices in dam and levee safety risk analysis. Denver: United States Bureau of Reclamation and United States Army Corps of Engineers. Denver

