

Manajemen Risiko Keselamatan dan Lingkungan pada Bendungan Ir. H. Djuanda Jatiluhur Jawa Barat dengan Pendekatan Event Tree Analysis

Adit Sri Atmaja¹, Sugiarto Sugiarto², Tatan Sukwika^{*3}

¹Program Studi Manajemen, Universitas Sahid, Jakarta

²Program Studi K3, Universitas Bhamada, Slawi Tegal

³Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Sahid, Jakarta

e-mail: *tatan.swk@gmail.com

Received 04 February 2023; Reviewed 07 March 2023; Accepted 28 April 2023

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

Doi: <https://doi.org/10.35334/be.v1i1.3479>

Abstract

The acidity level of Dam Ir. H. Djuanda (Jatiluhur) has been very concerning for the last five years until now. One of the bad effects of increasingly acidic water is it can cause corrosion in the construction of dams and, in the end, can be an environmental and safety risk. This study analyzes the environmental and safety risk management strategy at Ir. H. Djuanda. The survey method uses checklists and questionnaires to collect data. Data analysis of the main causes of dam safety and environmental risk using structural safety criteria includes structural hydraulic failure and seepage. Measuring risk probability with event tree analysis. The research resulted in failure probabilities: structural (0.000032614), hydraulic (0.000015), and seepage (0.0000155). Evaluation of structural safety risk management probability at Annual Probability of Failure = 0.0006 with category less than 1×10^{-4} per year (Acceptable). The total value of lost of life is 2,499,850 with the total expected benefits (E(TBt) of 0.856 people per year. This study concludes that environmental and safety risks are affected by: Structural failures, Hydraulic failure, and Seepage failure. Existing social and environmental risk conditions are in the "intolerable" category, where there is a potential risk of losing property and threatening the lives of 2.5 million people. Therefore, the managerial implication is that Jatiluhur Dam managers need to anticipate and control operations according to ALARP (As Low As Reasonably Practicable) standards.

Keywords: Safety and Environment, Event Tree Analysis, Jatiluhur Dam, Risk Management, Structural Failure

Abstrak

Tingkat keasaman Bendungan Ir. H. Djuanda (Jatiluhur) sangat memprihatinkan selama lima tahun terakhir hingga sekarang. Salah satu dampak buruk dari air yang semakin asam adalah dapat menyebabkan korosi pada konstruksi bendungan dan pada akhirnya dapat menimbulkan risiko lingkungan dan keselamatan. Penelitian ini menganalisis manajemen risiko lingkungan dan keselamatan di Bendungan Ir. H. Djuanda. Metode survei menggunakan instrumen *checklist* dan kuisioner untuk mengumpulkan data. Analisa data faktor penyebab utama keselamatan dan risiko lingkungan bendungan menggunakan kriteria keselamatan struktural meliputi kegagalan struktural hidrolis, dan rembesan. Pengukuran probabilitas risiko dengan analisis pohon kejadian (*event tree analysis*). Penelitian menghasilkan probabilitas kegagalan: struktural (0,000032614), hidrolis (0,000015), dan rembesan (0,0000155). Evaluasi probabilitas manajemen risiko keselamatan struktural pada *Annual Probability of Failure* = 0,0006 dengan kategori lebih kecil dari 1×10^{-4} per tahun (Dapat diterima). Nilai *total lost of life* 2.499.850 dengan total manfaat yang diharapkan (E(TBt) adalah 0,856 jiwa per tahun. Penelitian ini menyimpulkan bahwa risiko keselamatan dan lingkungan dipengaruhi oleh kegagalan struktural, kegagalan hidrolis, dan kegagalan rembesan. Kondisi eksisting risiko lingkungan dan sosial berkategori "tidak dapat ditoleransi" dimana ada potensi risiko kehilangan harta benda dan mengancam jiwa 2,5 juta penduduk. Oleh karena itu, implikasi manajerialnya adalah pengelola Bendungan Jatiluhur perlu melakukan antisipasi dan pengendalian operasional yang disesuaikan dengan standar ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*).

Kata kunci: Analisis Pohon Kejadian, Bendungan Jatiluhur, Kegagalan Struktural, Keselamatan dan Lingkungan, Manajemen Risiko

1. Pendahuluan

Bendungan Ir. H. Djuanda Jatiluhur, kabupaten Purwakarta, Jawa Barat merupakan salah satu bendungan serbaguna kategori besar yang pertama kali dibangun di Indonesia yang berada. Berdasarkan dokumen laporan BBWS-Citarum (2014) disebutkan bahwa Bendungan tersebut beroperasi sejak tahun 1967 dengan sistem kerja membendung Sungai Citarum sebagai sungai terpanjang di Jawa Barat dengan perolehan debit air rata-rata mencapai 5,5 milyar m³/tahun, dan/atau 175 m³/detik. Struktur bendungan bertipe urugan batu dengan inti tanah liat miring (*rock fill with inclined clay core*). Bangunan pelimpah utama berbentuk menara tipe *morning glory*, dengan bagian bawah berfungsi sebagai ruang pembangkit listrik (*power house*) terpasang 6 unit turbin dengan daya terpasang 187 MW dengan produksi tenaga listrik rata-rata 1000 juta kwh setiap tahun. Pada elevasi +49m.dpl terdapat dua buah saluran suplesi irigasi (*hollow jet valve*) untuk membantu apabila terjadi kekurangan pasok air ke hilir melalui pembangkit. Berdasarkan hasil pemeruman (*Depth sounding*) tahun 2014 untuk memperoleh gambaran (model) bentuk permukaan (topografi) dasar perairan (*seabed surface*) diketahui bahwa volume tampungan pada TMA +107 m dpl (*normal pool level*) sebesar 2.448 juta m³ dengan luas genangan ± 81,3 km² dengan rencana umur layanan waduk 277,5 tahun dari sejak tahun 1987 pada sedimentasi lumpur mencapai level “*dead storage*” yakni +75m.dpl (Jatiluhurdam, 2020).

Bendungan Ir. H. Djuanda selain memberikan manfaat cukup besar, namun dilain sisi memiliki potensi bahaya yang relatif tinggi. Apabila bendungan tersebut mengalami kejadian kegagalan dan/atau keruntuhan (sejenisnya), maka akan timbul bencana atau malapetaka bagi kelangsungan hidup manusia, harta benda, dan kerusakan lingkungan di daerah hilirnya. Maka itu pengelolaan Bendungan harus sesuai regulasi yang berlaku dalam hal ini Peraturan Menteri Permen PUPR No. 6 Tahun 2020 Jo Permen PUPR No. 27/PRT/M/2015 Tahun 2015 tentang bendungan, keamanan bendungan, serta pedoman operasi, pemeliharaan dan pengamatan bendungan dari departemen permukiman dan prasarana wilayah. Berikut Gambar 1 konsepsi keamanan bendungan yang dapat diukur atau dievaluasi. Bendungan dianggap aman apabila pembangunan dan pengelolaan bendungan dilaksanakan sesuai dengan konsepsi dan kaidah-kaidah keamanan bendungan yang tertuang didalam peraturan, standar, pedoman, dan manual (NSPM) yang berlaku. Konsepsi keamanan Bendungan memiliki tiga pilar, yaitu Keamanan Struktur, Pemantauan, Pemeliharaan dan Operasi, dan Kesiapsiagaan Tanggap Darurat.



Gambar 1. Diagram Konsepsi Keamanan Bendungan

(Sumber: Dirjen-SDA, 2011)

Menurut Ishbaev (2015), berdasarkan hasil inspeksi bahwa Bendungan Ir. H. Djuanda terlihat mengalami retakan memanjang di permukaan dekat *lining* hilir dengan dimensi retakan sepanjang

$\pm 116\text{m}$ dan disekitar patok geser C14 dengan kedalaman $\pm 12\text{cm}$ lebar $\pm 3\text{cm}$, di sisi lain terdapatnya rumput liat yang tumbuh disepanjang keliling *lining* puncak bendungan sehingga lubang drainase sering mengalami sumbatan. Area mengalami genangan disekitar patok geser ST61 dan pada aspal yang bergelombang dan/atau lendutan. Terdapat adanya rembesan di kaki lereng sebelah kiri bangunan pembangkit listrik sepanjang $\pm 200\text{m}$, dengan penyelidikan bahwa bocoran/rembesan tersebut berasal dari bukit tumpuan kiri bagian hilir (mata air) yang sifat kekuatan airnya berada dengan air waduk. Hasil stabilitas pengaruh Gempa menunjukkan bahwa Bendungan Ir. H. Djuanda tidak stabil akibat pengaruh gempa baik pada periode ulang $T = 100$ tahun maupun $T = 500$ tahun. Pada tahun 2011 Bendungan Ir. H. Djuanda mengalami penurunan sekitar 7m , dengan tinggi permukaan air waduk tersebut turun dari 101m menjadi $93,88\text{m}$. Penurunan tersebut disebabkan oleh rendahnya curah hujan di daerah tersebut akibat perubahan iklim, sehingga pasokan air ke daerah irigasi dikurangi. Hasil analisa Ishbaev (2015) menyebutkan pasokan normal yang besarnya $145000\text{ m}^3/\text{det}$ saat ini hanya sekitar $110.000\text{ m}^3/\text{det}$. Sementara itu, kondisi air di sekitar Bendungan mencapai tingkat keasaman relatif cukup tinggi, hal ini dapat menyebabkan korosi pada bangunan Bendungan, keasaman air tersebut dikarenakan keramba jaring apung yang ada diperairan tersebut (Jatiluhurdam, 2021).

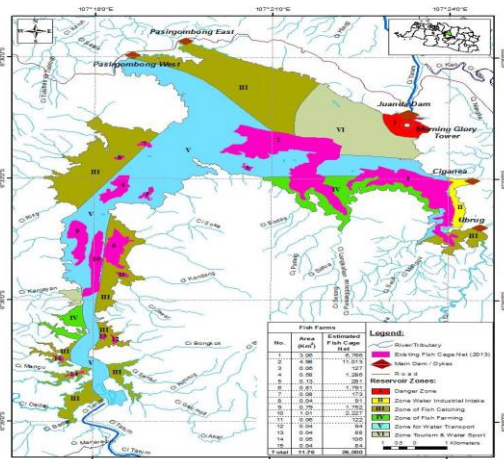
Upaya menghindari dan mengantisipasi kemungkinan kejadian kegagalan dan keruntuhan yaitu dengan menilai stabilitas keandalan keselamatan bendungan secara berkelanjutan. SNI 3432:2020 mengatur teknis melaksanakan pemeriksaan secara teratur dan konsisten oleh pengelola bendungan (SNI, 2020). Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 24 Tahun 2007 Pasal (40) bahwa “*Setiap kegiatan pembangunan yang mempunyai risiko tinggi yang menimbulkan bencana dilengkapi dengan analisis risiko bencana sebagai bagian dari usaha penanggulangan bencana sesuai dengan kewenangannya*”. Kewajiban analisa risiko bencana secara rinci disebutkan dalam Peraturan Pemerintah Nomor 21 tahun 2008, Pasal (12) tentang Penyelenggaraan Penanggulangan Bencana.

Penilaian risiko merupakan proses memeriksa dan menilai signifikansi risiko yang akan terjadi. Penilaian risiko dapat memberikan data untuk proses pengambilan keputusan dengan menghubungkan antara penerimaan dan risiko yang dapat ditoleransi atau diterima. Penilaian risiko harus dievaluasi secara konsisten oleh pembuat keputusan dalam menentukan prioritas atau peringkat pekerjaan perbaikan atau rehabilitasi yang diperlukan (Isomaki *et al.*, 2012; Adamo *et al.*, 2020). Hasil penilaian ini berguna untuk meningkatkan keselamatan berdasarkan risiko eksisting pada bendungan. Hasil penilaian ini juga dapat membantu mengimplementasikan pelaksanaan pemantauan bendungan, misalnya pemantauan instrumentasi meliputi pemantauan tekanan air pori, pemantauan debit rembesan, bocoran, pemantauan pergerakan internal, pemantauan pergerakan eksternal dan pemantauan percepatan gempa.

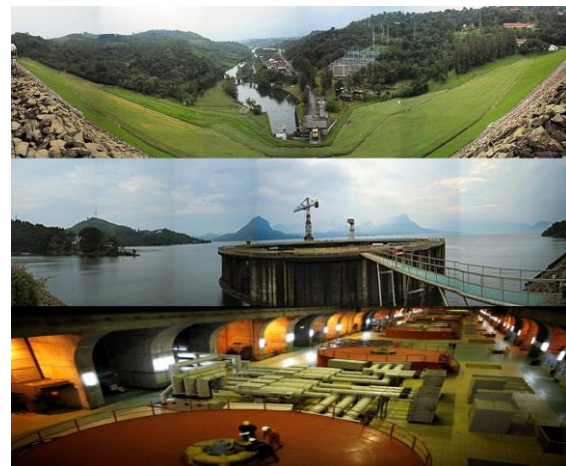
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis manajemen risiko keselamatan dan lingkungan di Bendungan Ir. H. Djuanda. Ruang lingkup penelitian ini membatasi pada analisa data terhadap faktor penyebab utama keselamatan Bendungan Ir. H. Djuanda Jatiluhur Jawa Barat khususnya pada keselamatan struktural meliputi: kegagalan hidrolis, kegagalan akibat rembesan, dan kegagalan struktural). Selanjutnya, kajian manajemen risiko terkait probabilitas risiko keselamatan bendungan menggunakan pendekatan analisa pohon kejadian atau *event tree analysis* (ETA). ETA diyakini mampu menggambarkan proses mekanisme atau skenario kegagalan (*failure*) yang mungkin dapat terjadi sebagai akibat dari suatu kejadian, yaitu risiko dapat diterima (*acceptable risk*) atau tidak diterima (*unacceptable risk*) (Ferdous *et al.*, 2011; Rosqvist *et al.*, 2013).

2. Metode Penelitian

Tempat penelitian di Bendungan Ir. H. Djuanda berlokasi di Kecamatan Jatiluhur, Kabupaten Purwakarta, Jawa Barat berjarak kurang lebih 84 km arah Tenggara Jakarta, dan 60 km arah Barat Laut Bandung. Berdasarkan koordinat geografis, posisi Tubuh Bendungan Jatiluhur berada pada $6^{\circ}31'$ Lintang Selatan dan $107^{\circ}23'$ Bujur Timur (Gambar 2 dan Gambar 3).



Gambar 2. Peta Lokasi Bendungan Ir. H. Djuanda (Sumber: BBWS-Citarum, 2014)



Gambar 3. Panorama Lokasi Bendungan Ir. H. Djuanda (Sumber: Jatiluhurdam, 2021)

Metode survei digunakan sebagai instrumen untuk mengambil data kegagalan di lapangan dan didukung berdasarkan data sekunder (Tabel 1). Data analisis menggunakan pendekatan pohon kejadian (*event tree*) dan selanjutnya dievaluasi menggunakan *odds ratio*. Analisis pohon kejadian (*event tree*) adalah alat atau instrumentasi umum yang digunakan untuk menganalisa keselamatan bendungan secara kuantitatif yang dilakukan dengan cara identifikasi, karakterisasi, dan perkiraan risiko (DIBR, 2019).

Hirarki terminologi *event tree* terdiri dari urutan node dan cabang yang saling berhubungan, setiap simpul akan dikaitkan dengan kejadian yang tidak pasti atau kondisi keadaan alami (DIBR, 2019). Sedangkan untuk menentukan evaluasi risiko memerlukan perhitungan terkait risiko keselamatan hidup (*life safety risk*) secara lingkungan sosial (Dirjen-SDA, 2011). Hasil perhitungan selanjutnya diinterpretasikan dengan menggunakan metode *as low as reasonably practicable* (ALARP) untuk memformulasikan kemungkinan kerugian kehidupan apabila terjadi kegagalan bendungan selama umur bendungan tersebut (Bowles 2013). Output dari pematkhiran ALARP akan menentukan nilai total manfaat yang diharapkan (E(TB_i)). Nilai manfaat diperoleh dari hasil nilai statistik *value of static life* (VOSL) dengan nilai dampak pengurangan bertahap atas hilangnya nyawa akibat risiko yang timbul dari umur bendungan (Norkhairi *et al.*, 2018).

Tabel 1. Matriks Instrumentasi Pengambilan Data

No.	Data Kegagalan	Instrumentasi Pohon Kejadian
1.	Kegagalan struktural (Beban kerja bendungan)	(1) Beban normal yaitu : berat sendiri, tekanan air waduk, tekanan angkat dan/atau tekanan pori; (2) Beban luar biasa yaitu : surut cepat, pembuntuan drainase, banjir, gempa atau OBE (<i>Operating Basis Earthquake</i>); (3) Beban ekstrim yaitu banjir maksimum dan gempa desain maksimum MDE (<i>Maximum Design Earthquake</i>); (4) Design pilar, pintu dan dinding pelimpah, vibrasi akibat aliran air, sarana (jalan, jembatan, atau tangga), operasi (normal/luar biasa/kedaruratan), kelengkapan operasi tertutup, dan ventilasi serta penerangan yang memadai.
2.	Kegagalan hidrolis (Desain objek)	(1) Pelimpah yang mampu mengalirkan banjir dengan aman; (2) <i>Freeboard</i> mencegah luapan air waduk diatas puncak bendungan; (3) Proteksi erosi dan longsoran; (4) Gaya statis dan dinamis; (5) <i>Emergency release</i> ; dan (6) Dinding tebing disekelilingnya.
3.	Kegagalan rembesan (Tubuh Bendungan, pondasi, tumpuan bendungan atau bukit tipis)	(1) <i>Exit gradient</i> ; (2) <i>Internal gradient</i> ; (3) Tekanan pori; (4) Debit rembesan; (4) <i>Uplift</i> ; (5) Lereng tubuh bendungan; dan (6) Retakan desikasi.

Probabilitas keselamatan struktural bendungan ditentukan berdasarkan model kegagalan yang terindikasi sesuai dengan kondisi eksisting. Berikut kriteria deskripsi angka probabilitas (*verbal descriptors*) seperti ditunjukkan pada Tabel 2 (DIPR, 2019). Apabila satu atau lebih model kegagalan berasal dari kejadian dari penyebab yang sama, maka dapat dihitung dengan menggunakan batas atas (*upper bound*) dan batas bawah (*lower bound*) (Ang dan Tang, 2015; Mouyeaux et al., 2015; Dwi et al., 2016). Batas atas (*upper bound*) adalah gabungan kejadian dari beberapa model dengan menggunakan pendekatan formula *de Morgan's*. $P_{ub} = 1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot \dots \cdot (1 - P_n)$. Dimana: P_{ub} adalah Perkiraan batas atas probabilitas kegagalan bersyarat; $P_1 \sim P_n$ adalah Perkiraan beberapa probabilitas kegagalan model individu; Batas bawah (*lower bound*) adalah probabilitas bersyarat individu maksimum.

Tabel 2. Verbal Descriptors

No.	Deskripsi	Probabilitas
1	Pasti (<i>Virtually Certain</i>)	0,999
2	Sangat Mungkin (<i>Very Likely</i>)	0,99
3	Mungkin (<i>Likely</i>)	0,9
4	Sedang (<i>Neutral</i>)	0,5
5	Tidak Mungkin (<i>Unlikely</i>)	0,1
6	Sangat Tidak Mungkin (<i>Very Unlikely</i>)	0,01
7	Mustahil (<i>Virtually Impossible</i>)	0,001

(Sumber: DIPR, 2019)

3. Hasil dan Pembahasan

Sistem bendungan memiliki banyak kesamaan dengan sistem infrastruktur rekayasa lainnya tetapi juga memiliki perbedaan signifikan dalam cara menanggapi bahaya dan mengelolanya. Strategi manajemen risiko keselamatan bendungan yang dapat digunakan untuk mengantisipasi kegagalan bendungan. Risiko keselamatan bendungan ditentukan berdasarkan analisa penilaian risiko dengan mengkombinasikan terkait analisa risiko dan evaluasi risiko (Isomaki et al., 2012; Adamo et al., 2020).

Tabel 3. Rekapitulasi Probabilitas Event Tree Kegagalan Struktural, Kegagalan Hidrolis, dan Kegagalan Rembesan Bendungan

No	Model Kegagalan	Komponen/ Beban	Indikasi	Probability (Pr)	
1	Kegagalan Struktural	Beban Normal	Berat Sendiri	0,000001	
			TMA	0,00000999	
			Tekanan Angkat / Pori	0,00000001	
		Beban Luar Biasa	Surut Cepat El Muka Air Maksimal sd Terendah Tanpa Gempa	0,000001	
			Pembuatan Drainase	0,000001	
			Operasi Banjir Waduk	0,00000001	
			Gempa OBE (periode ulang 100 Tahun)	0,0000011	
			Banjir Maksimum	0,0000005	
		Beban Ekstrim	Gempa MDE (periode ulang 10.000 tahun)	0,00000495	
			Design Pilar	Puncak Bendung Permukaan Aspal Beton	0,000005
				Puncak Bendung Tembok Parapet	0,000005
				Lereng Hulu Timbunan Batu	0,0000025
		Pintu Dinding Pelimpah	Lereng Hulu Balok Beton	0,0000025	
			Lereng Hilir (Urugan Andesit & Riprap)	0,000005	
			Sambungan Permukaan Beton jalan Setapak E dan F	0,000005	
			Permukaan lain dari Bangunan Pelimpah Unit F dan L	0,000005	
			Galery Drainase	0,000005	
			Akses Galery Drainase	0,000005	
			Vibrasi	Vibrasi Akibat Aliran Air	0,0000010
		Jalan & Jembatan	Akses Spillway	0,0000010	

Lanjutan Tabel 3 Rekapitulasi Probabilitas Event Tree Kegagalan Struktural, Kegagalan Hidrolis, dan Kegagalan Rembesan Bendungan

No	Model Kegagalan	Komponen/ Beban	Indikasi	Probability (Pr)
		Tangga	Bintik Karat	0,00000999
		Kinerja Operasi	Operasi Normal	0,000001
			Operasi Darurat	0,000001
			Operasi Operator	0,000001
		Kinerja Kelengkapan	Bangunan Pengambilan	0,000001
		Operasi Tertutup	Bangunan Pengeluaran	0,000001
		Ventilasi & Penerangan	Ventilasi	0,000001
			Penerangan	0,000001
			Jumlah	0,000032614
2	Kegagalan Hidrolis	Bangunan Pelimpah	Elevasi Puncak Tetap 111,51 m dengan Puncak Spillway 2931 m ³ /s	0,000001
		Freeboard	Bendungan Saguling pelimpah puncak lebih dari 2400m ³ /detik dan Bendungan Cirata 3.480 m ³ /detik	0,0000005
		Proteksi Erosi dan Longsoran	Terdapat Riwayat Longsoran	0,000001
		Gaya Statis dan Dinamis	Gaya Geser Vertikal & Horizontal	0,000001
		Emergency Release	Morning Glory Tanpa Gerbang	0,0000005
			Pelimpah Tambahan Ubrug	0,000001
		Dinding Tebing	Pengujian Dinding Tebing	0,00001
			Jumlah	0,000015
3	Kegagalan Rembesan	Exit Gradient	Pengujian	0,0000010
		Internal Gradient	Pengujian	0,0000010
		Tekanan Pori	Pembacaan Pisometer	0,0000010
		Debit Rembesan	Analisa Rembesan	0,0000010
		Uplift	Kondisi	0,0000010
		Lereng Tubuh Bendung	Analisa Stabilitas Pelandaian lereng Bendungan Utama	0,0000005
		Retakan Desikasi	Riwayat Retakan Desikasi	0,000010
			Jumlah	0,0000155

Peningkatan kejadian kegagalan komponen tertentu berpengaruh pada lama waktu pemulihannya. Oleh sebab itu, penilaian perkiraan risiko keselamatan bendungan dengan analisis pohon kejadian atau *event tree analysis* (ETA) terhadap kelemahan sistem menjadi sangat diperlukan (Ferdous et al., 2011; Rosqvist et al., 2013; Zielinski, 2020). Analisa pohon kejadian (*event tree*) adalah alat atau instrumentasi umum yang digunakan untuk menganalisa keselamatan bendungan secara kuantitatif yang dilakukan dengan cara identifikasi, karakterisasi, dan perkiraan risiko (DIPR, 2019).

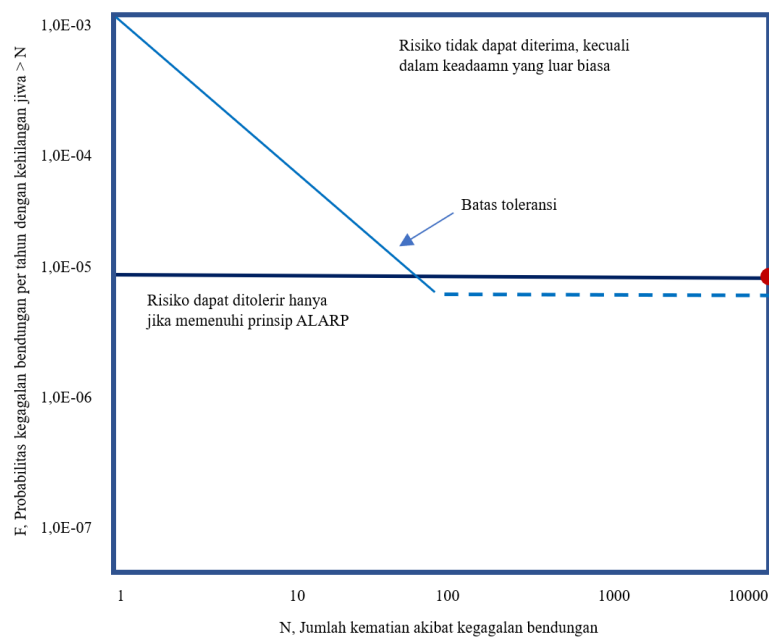
Hasil analisa risiko bendungan menggunakan metode ETA menunjukkan bahwa keragaman nilai probabilitas manajemen risiko keselamatan struktural di Bendungan Ir. H. Djuanda. Probabilitas kegagalan struktural Bendungan sebesar 0,000032614, Probabilitas kegagalan hidrolis Bendungan sebesar 0,000015, Probabilitas kegagalan rembesan Bendungan sebesar 0,0000155, Evaluasi probabilitas manajemen risiko keselamatan struktural di Bendungan menunjukkan Nilai APF (*Annual Probability of Failure*) sebesar 0,0006 dengan kategori lebih kecil dari 1×10^{-4} per tahun sehingga dapat diterima.

Faktor kegagalan struktural, hidrolis, dan rembesan bendungan sangat ditentukan oleh kondisi spesifikasi material urugan dan stabilitas bendungan terhadap daya dukung dan daya tampung lingkungan, penurunan permukaan, pola aliran filtrasi, dan kontur lereng bendungan (Isomaki et al., 2012; Ang & Tang, 2015; Ishbaev, 2015; Mouyeaux et al., 2016; Dwi et al., 2016; Pratama et al., 2021). Tabel 3 menyajikan rekapitulasi probabilitas *event tree* kegagalan struktural, kegagalan hidrolis, dan kegagalan rembesan bendungan.

Secara *Life safety risk*, menurut Dirjen-SDA (2011) jika bendungan dilakukan peninggian maka pihak yang paling berisiko adalah individu atau kelompok masyarakat. Oleh karena itu, probabilitas kegagalan bendungan nilainya harus melebihi dari 1×10^{-5} per tahun, sedangkan tanpa peninggian probabilitas kegagalan bendungan nilainya harus melebihi dari 1×10^{-4} per tahun. Risiko yang

ditimbulkan oleh keduanya yaitu tanpa atau dengan peninggian tetaplah tidak dapat diterima, karena menyangkut harta dan nyawa manusia (Dwi et al., 2003).

Pengelolaan strategi manajemen risiko keselamatan struktural di Bendungan Ir. H. Djuanda dilakukan melalui analisa risiko sosial dengan memperkirakan kehilangan harta benda dan nyawa manusia. Hasil observasi diketahui terdapat 68 kecamatan yang tersebar Kabupaten Bandung Barat, Cianjur, Purwakarta, Karawang dan Bekasi berpotensi risiko sosial akibat Kegagalan Keselamatan Bendungan Ir. H. Djuanda. Sebanyak 482 desa berpotensi terkena risiko sosial dimana dampaknya berupa kehilangan harta benda dan nyawa sekitar 2,5 juta penduduk. Menurut Sukandani dan Sukwika (2023) bahwa masyarakat yang hidup di sekitar bendungan bergantung pada asset lahan yang dimilikinya untuk bertani, berladang, bertambak, hingga tempat tinggal keluarga.



Gambar 4. ALARP Keselamatan Struktural Bendungan Ir H. Djuanda

Gambaran eksisting risiko sosial ditentukan oleh nilai APF (*annual probability of failure*) yang ditunjukkan dengan grafik kriteria risiko sosial dan lingkungan (Gambar 4). Berdasarkan hasil analisa terhadap grafik kriteria risiko sosial menyatakan bahwa keselamatan struktural di Bendungan Ir. H. Djuanda berkategori “tidak dapat ditoleransi” karena adanya penduduk yang terkena dampak di hilir bendungan sehingga diperlukan upaya pengendalian atau pengurangan risiko terkait dampak di hilir dengan total *lost of life (LOL)* sebesar 2.499.850 dan total manfaat yang diharapkan ($E(TB_i)$) 27.139.991.600 \approx 10.856 jiwa per tahun.

Nilai APF terhadap grafik kriteria risiko sosial menyatakan bahwa tidak dapat ditoleransi karena adanya penduduk yang terkena dampak di hilir bendungan sehingga diperlukan upaya pengendalian atau pengurangan risiko terkait dampak di hilir. Pehitungan selanjutnya adalah LOL atau Kehilangan Umur Pelayanan. LOL dapat mengestimasi (E) dampak yang bisa terjadi. Berikut hasil perhitungan keselamatan struktural Bendungan Ir. H. Djuanda menggunakan formula ELOL (*estimation lost of life*) (Mouyeaux et al., 2015; Norkhairi et al., 2018; Thoyibahri et al., 2021). Diketahui: $E(LOL) = 2.500.000$; $P_f = 0,0006$; $[1-(1-P_f)^y] = [1-(0,0006)] = 0,99994$. Maka: $E(LOL_{damlife}) = E(LOL) \times [1-(1-P_f)^y] = 2.500.000 \times 0,99994 = 2.499.850$. Dimana: $E(LOL)$: Estimasi *Lost of Life* (Penentuan Kehilangan Umur Pelayanan); P_f : Probabilitas kegagalan bendungan tahunan.

Pemutakhiran ALARP diperlukan untuk menentukan total manfaat yang diharapkan ($E(TB_i)$) yaitu dengan cara mengalikan nilai statistik *Value of Statistic Life* (VOSL) dengan pengurangan bertahap dalam memperkirakan hilangnya nyawa akibat umur bendungan. Berikut rumus dan perhitungan $E(TB_i)$ (Mouyeaux et al., 2015; Norkhairi et al., 2018; Gentry dan Viscusi, 2016; Thoyibahri et al., 2021): Diketahui: $E(LOL_{damlife}) = 2.499.850$; VOSL = Akumulasi Usia Bendungan 1967-2023 = 56; $E(D \text{ and } O\&M \text{ Costs}_{damlife}) \text{ Incremental} = \text{Rp. } 27.000.000.000$. Maka: $E(TB_i) = E(LOL_{damlife}) \text{ Incremental} \times \text{VOSL} + E(\text{DOM Costs}_{damlife}) \text{ Incremental}$. $E(TB_i) = 2.499.850 \times 56 + 27.000.000.000 = 27.139.991.600 \approx 10.856$ jiwa per tahun. Dimana: $E(TB_i)$ = Total manfaat yang diharapkan; $E(LOL_{damlife})$ = Total perkiraan kehilangan nyawa selama bendungan beroperasi; VOSL = *Value of Statistic Life*; $E(\text{DOM Costs}_{damlife}) \text{ Incremental}$ = *Total cost estimate Damage Operation Maintenance*.

4. Kesimpulan

Penyebab utama keselamatan struktural di Bendungan Ir. H. Djuanda dipengaruhi oleh: Kegagalan struktural meliputi beban normal (berat sendiri, tekanan air waduk, tekanan angkat dan/atau tekanan pori), beban luar biasa (surut cepat, pembuntuan drainase, banjir, gempa atau OBE (*Operating Basis Earthquake*), beban ekstrim yaitu banjir maksimum dan gempa desain maksimum MDE (*Maximum Design Earthquake*), dan Design pilar, pintu dan dinding pelimpah, vibrasi akibat aliran air, sarana (jalan, jembatan, atau tangga), operasi (normal/luar biasa/ke daruratan), kelengkapan operasi tertutup, dan ventilasi serta penerangan yang memadai. Kegagalan hidrolis dipengaruhi oleh Pelimpah yang mampu mengalirkan banjir dengan aman, *Freeboard* mencegah luapan air waduk diatas puncak bendungan, Proteksi erosi dan longsor, Gaya statis dan dinamis; *Emergency releas*, dan dinding tebing di sekelilingnya. Kegagalan rembesan yang diperhitungkan atas dasar tubuh bendungan, pondasi, tumpuan bendungan atau bukit tipis di sekeliling bendungan, dengan memperhatikan *Exit gradient*, *Internal gradient*, Tekanan pori, Debit rembesan, *Uplift*, Lerang tubuh bendungan, dan Retakan desikasi.

Daftar Pustaka

- Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Laue, J., & Knutsson, S. (2020). Dam safety: The question of tailings dams. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 11(1), 1-26.
- Ang, A. H. S., & Tang, W. H. (2015). Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications in Civil & Environmental Engineering. *Journal of the Korean Society of Steel Structures*, 27(4), 72-72.
- Bowles, D. S. (2013). What is ALARP and how can it improve dam safety decisions. In *ASDSO 2013 Conference on Dams, Providence, Rhode Island* (pp. 8-12).
- DIBR. (2019). *Dam Safety Risk Analysis Methodology*. U.S Departement of the interior Bureu of Reclamation.
- Dirjen-SDA. (2011). *Penilaian Risiko Bendungan*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum.
- Dirjen-SDA. (2015). *Dam Safety Improvement and Rehabilitation the Dam Operational Improvement and Safety Project (DOISP)*. Direktorat Jendral Sumber Daya Air Balai Besar Wilayah Sungai Citarum.
- Dwi Y. C., Juwono P. T., Yuliani E. (2016). *Analisa Probabilitas Risiko Kegagalan Bendungan Gerogkak Berdasarkan Metode Pohon Kejadian (Event Tree)*. Malang: Univeritas Brawijaya.
- Ferdous, R., Khan, F., Sadiq, R., Amyotte, P., & Veitch, B. (2011). Fault and event tree analyses for process systems risk analysis: uncertainty handling formulations. *Risk Analysis: An International Journal*, 31(1), 86-107.

- Gentry, E. P., & Viscusi, W. K. (2016). The fatality and morbidity components of the value of statistical life. *Journal of Health Economics*, 46, 90-99
- Ishbaev, A. (2015). *Evaluasi Keamanan DAM Berbasis Indeks Risiko pada DAM Jatiluhur di Jawa Barat*. Bogor: Sekolah Pasca Sarjana Institut Pertanian Bogor.
- Isomaki E, Torkkel M, Sulkokoski M, Timo M. (2012). *Dam Safety Guide*. Häme Centre for Economic Development, Transport and the Environment.
- Mouyeaux, A., Carvajal, C., Peyras, L., Bressolette, P., Breul, P., & Bacconnet, C. (2015). Probability of failure of an embankment dam due to slope instability and overtopping. In *Proceedings of the 13th ICOLD International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams* (pp. 9-11).
- Norkhairi, F. F., Thiruchlvam, S., & Hasini, H. (2018). Review methods for estimating loss of life from floods due to dam failure. *Int. J. Eng. Technol*, 7, 93-97.
- Permen. (2015). Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 27/PRT/M/2015 tentang Bendungan.
- Permen. (2020). Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 6 Tahun 2020 Tentang Perubahan Atas Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Nomor 27/PRT/M/2015 Tentang Bendungan.
- Perpres. (2010). Peraturan Presiden Nomor 37 Tahun 2010 tentang Bendungan.
- Perpres. (2020). Peraturan Presiden Nomor 27 Tahun 2020 tentang Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2020 Nomor 40).
- Pratama, R. R., Suprijanto, H., & Asmaranto, R. (2021). Analisa Stabilitas Tubuh Bendungan Utama Pada Bendungan Semantok, Nganjuk, Jawa Timur. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 1(1), 89-102.
- Rosqvist, T., Molarius, R., Virta, H., & Perrels, A. (2013). Event tree analysis for flood protection—An exploratory study in Finland. *Reliability Engineering & System Safety*, 112, 1-7.
- SNI 3432:2020 tentang Keamanan Bendungan. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional (BSN).
- Sukamdani, N. B., & Sukwika, T. (2023). Erosion prevention through empowerment of human resources to support food security around the Kambaniru watershed, East Nusa Tenggara. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1133, No. 1, p. 012061). IOP Publishing.
- Thoyibahri, B., Cahyono, C., & Setyandito, O. (2021). Qualitative assessment of deterioration embankment dam using index condition and annual probability of failure (APF) using event tree method. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 794, No. 1, p. 012060). IOP Publishing.
- Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2019 Nomor 190, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 6405).
- Zielinski, A. (2020). *Event Tree in the Assessment of DAM Safety Risks*. Toronto: Ontario Power Generation.

