

Penguatan Rencana Tindak Darurat melalui Sistem Peringatan Dini Terintegrasi pada Bendungan Meninting

Jiden Desta Mahendro^{1*}, I. Nyoman Lokajaya², Nurani Hartatik³

¹⁻³ Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, Indonesia

*Corresponding Email: jiden.desta@gmail.com

Abstrak: Bendungan Meninting merupakan infrastruktur sumber daya air strategis dengan klasifikasi bahaya sangat tinggi. Skenario kegagalan bendungan dalam dokumen Rencana Tindak Darurat (RTD) menunjukkan potensi genangan sekitar 2.997 ha yang dapat memengaruhi 130.976 jiwa atau 32.740 kepala keluarga di Kabupaten Lombok Barat dan Kota Mataram. Artikel ini bertujuan mengevaluasi kesiapan RTD, mengidentifikasi akar masalah kedaruratan, dan merumuskan solusi rekayasa prioritas untuk meningkatkan keselamatan masyarakat hilir. Data bersumber dari observasi lapangan, dokumen teknis bendungan, data hidrologi dan operasi, peta genangan, data kependudukan, serta dokumen RTD. Analisis dilakukan menggunakan Fishbone Diagram dan 5 Whys, sedangkan prioritas solusi ditentukan dengan Weighted Decision Matrix berdasarkan efisiensi, biaya, keamanan, dan keberlanjutan. Hasil menunjukkan bahwa akar masalah utama terletak pada belum optimalnya integrasi pemantauan, peringatan dini, komunikasi berjenjang, koordinasi antarinstansi, dan kesiapsiagaan masyarakat. Penguatan Early Warning System (EWS) memperoleh skor tertinggi 4,60 dan dipilih sebagai solusi utama. EWS terintegrasi dengan RTD menjadi pendekatan nonstruktural penting untuk menurunkan konsekuensi kegagalan bendungan.

Kata kunci: Kata kunci: Bendungan Meninting; Rencana Tindak Darurat; sistem peringatan dini; keamanan bendungan; manajemen risiko

Abstract: Meninting Dam is a strategic water-resources infrastructure classified as a very-high-hazard dam. The Emergency Action Plan (EAP) failure scenario indicates a potential inundation area of approximately 2,997 ha, affecting 130,976 people or 32,740 households in West Lombok Regency and Mataram City. This article evaluates EAP preparedness, identifies root causes of emergency risk, and formulates a priority engineering solution for downstream public safety. Data were obtained from field observations, technical documents, hydrological and operational data, inundation maps, population data, and the EAP document. Root causes were examined using a Fishbone Diagram and the 5 Whys method, while alternatives were ranked through a Weighted Decision Matrix using efficiency, cost, safety, and sustainability criteria. The analysis shows that the key problem concerns insufficient integration of monitoring, early warning, tiered communication, inter-agency coordination, and community preparedness. Strengthening the Early Warning System (EWS) achieved the highest score of 4.60 and was selected as the main solution. An EWS integrated with the EAP is therefore an essential non-structural measure for reducing dam-failure consequences.

Keywords: Keywords: Meninting Dam; Emergency Action Plan; Early Warning System; dam safety; risk management

PENDAHULUAN

Bendungan memberikan manfaat besar bagi penyediaan air, irigasi, pengendalian banjir, dan ketahanan wilayah. Pada saat yang sama, keberadaan tampungan air dalam volume besar membentuk risiko berkonsekuensi tinggi apabila terjadi kerusakan struktur, kegagalan operasi, banjir ekstrem, atau rangkaian gangguan yang berkembang tanpa terdeteksi. Dalam konteks keselamatan bendungan, rendahnya probabilitas kejadian tidak mengurangi kebutuhan untuk mengelola konsekuensi secara sistematis, terutama ketika kawasan hilir telah berkembang menjadi permukiman, pusat pelayanan publik, jaringan transportasi, dan aktivitas ekonomi.

Bendungan Meninting berada di Kabupaten Lombok Barat, Provinsi Nusa Tenggara Barat, pada aliran Sungai Meninting dalam Wilayah Sungai Lombok. Bendungan ini dirancang sebagai bendungan urugan batu dengan inti tegak, memiliki tinggi 74 m dari dasar pondasi, panjang puncak 418 m, dan tampungan bruto 10,43 juta m³. Infrastruktur tersebut melayani irigasi sekitar 1.559 ha dan penyediaan air baku 150 L/det untuk kawasan Gunungsari dan Batu Layar. Besarnya manfaat tersebut menjadikan kontinuitas operasi bendungan penting, tetapi

klasifikasi bahaya sangat tinggi menuntut sistem keselamatan yang berorientasi pada perlindungan jiwa.

Dokumen RTD Bendungan Meninting memperkirakan skenario kegagalan dapat menimbulkan genangan sekitar 2.997 ha dan berdampak terhadap 130.976 jiwa atau 32.740 kepala keluarga. Sebaran wilayah terdampak melintasi beberapa kecamatan di Kabupaten Lombok Barat dan sebagian wilayah Kota Mataram. Kondisi ini menunjukkan bahwa penanganan kedaruratan tidak cukup dilakukan oleh pengelola bendungan. Sistem harus menghubungkan pengelola, Balai Wilayah Sungai, pemerintah daerah, BPBD, aparat keamanan, dinas teknis, pemerintah kecamatan dan desa, serta masyarakat yang berada pada zona genangan.

Rencana Tindak Darurat merupakan instrumen nonstruktural untuk memastikan gejala abnormal dikenali, status kedaruratan ditetapkan secara tepat, informasi disampaikan melalui rantai komando yang jelas, dan masyarakat memperoleh waktu yang cukup untuk melakukan tindakan perlindungan. Pedoman nasional menempatkan RTD sebagai bagian dari pengelolaan keselamatan bendungan (Pengelola Bendungan Meninting, 2022); (Pemerintah Republik Indonesia, 2010); (Kementerian PUPR, 2015); (Pemerintah Republik Indonesia, 2019). Pendekatan ini sejalan dengan manajemen risiko ISO 31000 dan tata kelola insiden ISO 22320 yang menekankan identifikasi risiko, pembagian peran, interoperabilitas informasi, serta perbaikan berkelanjutan (International Organization for Standardization, 2018a), (International Organization for Standardization, 2018b).

Kajian internasional menunjukkan bahwa pengurangan korban pada banjir akibat kegagalan bendungan sangat dipengaruhi oleh waktu peringatan, pemahaman risiko, efektivitas evakuasi, dan keterhubungan antara komponen teknis serta sosial (Rodrigues et al., 2002); (Marchezini, 2020); (Maranzoni et al., 2024); (Ferrari et al., 2023); (Ge et al., 2022); (Silva & Eleutério, 2023). Sistem peringatan dini yang hanya berfokus pada sensor belum memadai apabila tidak didukung oleh protokol keputusan, pesan peringatan yang dapat dipahami, jalur komunikasi cadangan, simulasi, dan kapasitas masyarakat. Karena itu, artikel ini memandang EWS sebagai sistem sosio-teknis, bukan sekadar perangkat keras.

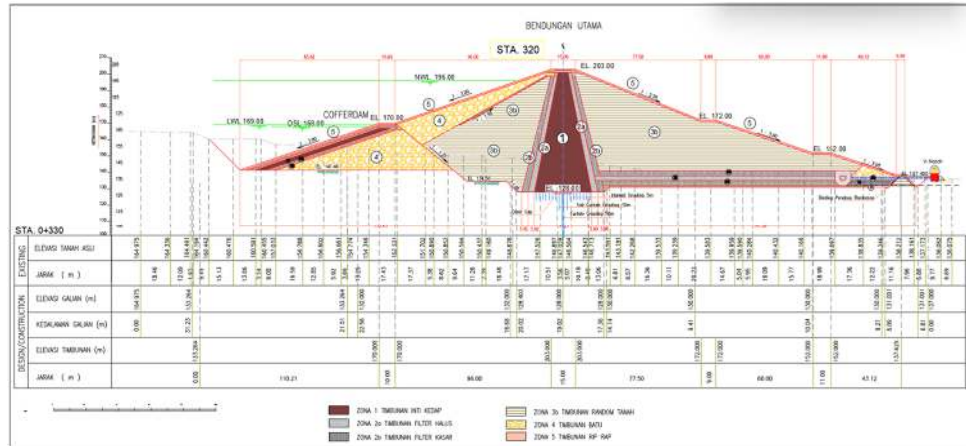
Kontribusi artikel ini adalah: (1) menyusun diagnosis akar masalah kesiapsiagaan RTD menggunakan kombinasi Fishbone Diagram dan 5 Whys; (2) membandingkan alternatif solusi menggunakan matriks keputusan berbobot; dan (3) merumuskan arsitektur EWS terintegrasi untuk Bendungan Meninting. Hasil kajian diharapkan menjadi dasar penyempurnaan RTD dan pengembangan indikator kinerja kesiapsiagaan yang lebih terukur.

Karakteristik Bendungan dan Konteks Risiko

Tabel 1. Parameter utama Bendungan Meninting

Komponen	Parameter	Nilai
Daerah aliran sungai	Luas DAS	32,77 km ²
Waduk	Tampungan bruto / efektif	10,43 / 9,03 juta m ³
Tubuh bendungan	Tipe; tinggi; panjang puncak	Urugan batu inti tegak; 74 m; 418 m
Muka air	MAN; MAB Q1000; MAB QPMF	+196,00; +198,70; +200,97 mdpl
Hidrologi	Debit Q1000; QPMF	455; 1.179 m ³ /det
Pelimpah	Tipe; kapasitas	Pelimpah samping berpintu; 817,89 m ³ /det
Manfaat	Irigasi; air baku	1.559 ha; 150 L/det

Komponen	Parameter	Nilai
Konsekuensi	Genangan; penduduk terdampak	±2.997 ha; 130.976 jiwa



Gambar 1. Potongan tipikal tubuh Bendungan Meninting (sumber: dokumen teknis bendungan).

Potongan melintang pada Gambar 1 memperlihatkan zonasi material tubuh bendungan, inti kedap, filter, timbunan random, serta hubungan dengan cofferdam. Konfigurasi ini menegaskan bahwa pemantauan keadaan bendungan harus mencakup respons rembesan, deformasi, kestabilan lereng, kondisi drainase, dan perubahan muka air. Data instrumen perlu diterjemahkan menjadi ambang operasional yang terhubung dengan keputusan RTD, sehingga perubahan data tidak berhenti sebagai catatan teknis tetapi menjadi informasi yang dapat ditindaklanjuti.

Ancaman yang dipertimbangkan dalam RTD meliputi banjir ekstrem, gempa, rembesan tidak normal, deformasi atau penurunan stabilitas, gangguan pelimpah dan intake, kerusakan instrumen, serta gangguan eksternal pada komunikasi dan akses. Risiko aktual merupakan kombinasi antara bahaya, paparan, kerentanan, dan kapasitas respons. Oleh sebab itu, evaluasi tidak hanya menilai kondisi struktur, tetapi juga kesiapan organisasi dan masyarakat hilir.

METODE

Penelitian menggunakan desain studi kasus rekayasa dengan pendekatan deskriptif-evaluatif. Unit analisis adalah sistem RTD Bendungan Meninting, yang dipandang sebagai rangkaian fungsi pemantauan, evaluasi teknis, pengambilan keputusan, komunikasi, peringatan, dan evakuasi. Tahapan kajian meliputi pengumpulan data, identifikasi kesenjangan, analisis akar masalah, perumusan alternatif, pemilihan solusi, desain sistem, serta verifikasi dan validasi prosedural.

Sumber dan Teknik Pengumpulan Data

Data primer diperoleh melalui observasi lapangan pada bendungan dan bangunan pelengkap serta diskusi teknis terkait pelaksanaan pemantauan dan RTD. Data sekunder meliputi gambar desain, parameter hidrologi dan operasi, peta zona genangan, data penduduk terdampak, struktur organisasi, bagan pemberitahuan keadaan darurat, jalur evakuasi, regulasi, standar, dan dokumen RTD Bendungan Meninting tahun 2022 (Pengelola Bendungan Meninting, 2022).

Tabel 2. Hubungan data, metode, dan keluaran analisis

Tahap	Data/masukan	Metode	Keluaran
Identifikasi risiko	Teknis, hidrologi, genangan, penduduk	Telaah dokumen dan observasi	Daftar ancaman dan konsekuensi
Diagnosis	Temuan sistem, SDM, metode, lingkungan, data	Fishbone Diagram	Kelompok penyebab potensial
Pendalaman	Rantai sebab-akibat	5 Whys	Akar masalah prioritas
Pemilihan solusi	Empat alternatif mitigasi	Weighted Decision Matrix	Peringkat alternatif
Desain	RTD, rantai komunikasi, media peringatan	Systems engineering	Arsitektur EWS terintegrasi
Verifikasi	Prosedur sebelum–sesudah	Telaah dokumen dan simulasi koordinasi	Perubahan indikator kesiapsiagaan

Analisis Akar Masalah

Fishbone Diagram digunakan untuk mengelompokkan penyebab ke dalam lima kategori: lingkungan, struktur/peralatan, metode, manusia/organisasi, dan material/data. Selanjutnya, 5 Whys digunakan untuk menelusuri mengapa konsekuensi terhadap masyarakat tetap tinggi meskipun dokumen RTD telah tersedia. Kombinasi ini dipilih agar diagnosis tidak berhenti pada gejala, misalnya keterlambatan informasi, tetapi mencapai isu sistemik berupa integrasi dan pengujian mekanisme kesiapsiagaan.

Pemilihan Alternatif

Empat alternatif dinilai: peningkatan intensitas pemantauan, penguatan EWS, simulasi dan pelatihan RTD, serta digitalisasi RTD. Kriteria yang digunakan adalah efisiensi 30%, biaya 20%, keamanan 35%, dan keberlanjutan 15%. Setiap alternatif diberi skor 1–5. Skor total dihitung dengan persamaan $S = \sum(w_i \times x_i)$, dengan w_i sebagai bobot kriteria dan x_i sebagai skor alternatif.

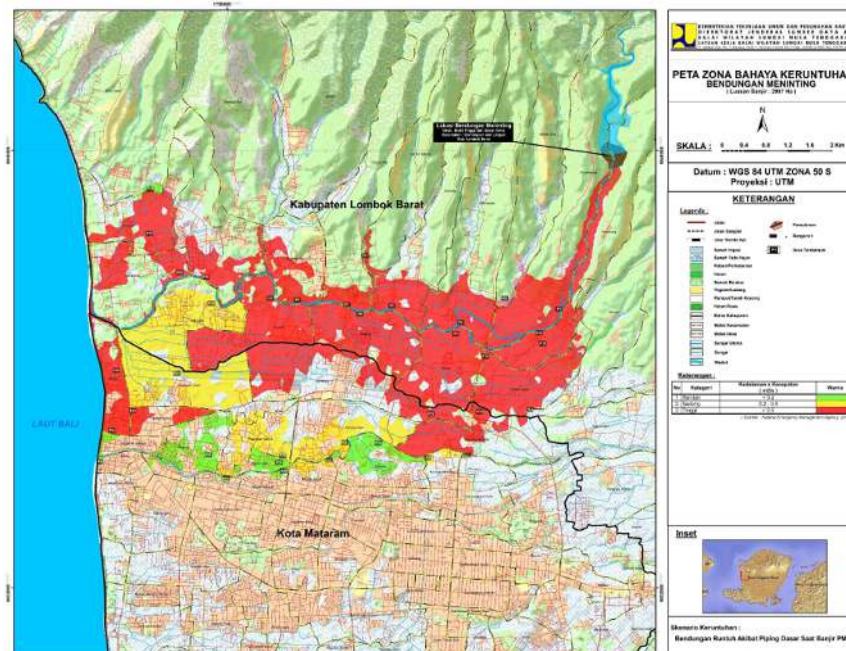
Batasan Penelitian

Evaluasi didasarkan pada dokumen, observasi, dan simulasi koordinasi. Kajian belum melakukan uji lapangan penuh yang mengukur waktu tempuh banjir, waktu aktivasi sirine, tingkat keterdengaran, kepatuhan evakuasi, atau tingkat keberhasilan komunikasi dalam kondisi gangguan. Karena itu, hasil implementasi dinyatakan sebagai peningkatan kesiapan prosedural, bukan bukti kuantitatif pengurangan korban.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Paparan Wilayah Hilir dan Implikasi Kedaruratan

Peta zona bahaya pada Gambar 2 menunjukkan koridor genangan yang memanjang dari lokasi bendungan menuju kawasan hilir Kabupaten Lombok Barat dan Kota Mataram. Luas genangan diperkirakan sekitar 2.997 ha. Paparan penduduk mencapai 130.976 jiwa atau 32.740 kepala keluarga. Besarnya paparan meningkatkan kompleksitas peringatan karena karakter permukiman, akses jalan, kepadatan, fasilitas publik, dan kemampuan mobilitas masyarakat berbeda antarwilayah.



Gambar 2. Peta zona bahaya akibat potensi kegagalan Bendungan Meninting (sumber: RTD Bendungan Meninting).

Dari perspektif manajemen kedaruratan, peta genangan tidak hanya berfungsi untuk menyatakan area terdampak, tetapi menjadi basis segmentasi zona peringatan dan evakuasi. Setiap zona idealnya memiliki informasi waktu tiba gelombang banjir, kedalaman dan kecepatan aliran, jumlah penduduk berdasarkan waktu siang–malam, kelompok rentan, jalur keluar, titik aman, kapasitas tempat evakuasi, serta media komunikasi yang tersedia. Kajian risiko korban jiwa pada banjir akibat kegagalan bendungan menekankan pentingnya memperhitungkan variasi paparan dan waktu peringatan (Maranzoni et al., 2024); (Ferrari et al., 2023); (Ge et al., 2022).

Dokumen yang dikaji telah memuat peta genangan dan bagan pemberitahuan, tetapi operasionalisasi berbasis zona masih perlu diperdalam. Satu pesan umum untuk seluruh wilayah berpotensi menghasilkan respons yang tidak seragam. Wilayah yang memiliki waktu tiba lebih singkat memerlukan pemicu peringatan lebih awal dan prosedur evakuasi otomatis, sedangkan wilayah dengan waktu tiba lebih panjang dapat menggunakan tahapan konfirmasi yang lebih lengkap. Segmentasi ini juga penting untuk mencegah kemacetan pada jalur evakuasi dan memastikan sumber daya bantuan ditempatkan sesuai prioritas.

Temuan ini memperlihatkan bahwa risiko Bendungan Meninting merupakan risiko sistemik. Struktur bendungan, sistem monitoring, pusat kendali, jaringan telekomunikasi, kewenangan antarlembaga, dan perilaku masyarakat saling memengaruhi. Kegagalan satu komponen dapat mengurangi waktu respons keseluruhan. Oleh sebab itu, EWS perlu dirancang dengan redundansi, prosedur cadangan, dan indikator kinerja yang dapat diuji.

Analisis Akar Masalah Kesiapsiagaan RTD

Hasil Fishbone Diagram mengidentifikasi penyebab pada lima kelompok. Faktor lingkungan mencakup hujan ekstrem, banjir mendekati debit rencana, gempa, dan ketidakpastian hidrologi. Faktor struktur/peralatan mencakup rembesan, deformasi, gangguan pelimpah atau intake, serta kerusakan instrumen. Faktor metode mencakup keterlambatan deteksi, ambang keputusan yang belum terhubung dengan prosedur, dan simulasi yang tidak

rutin. Faktor manusia/organisasi mencakup kompetensi petugas, keterlambatan pelaporan, koordinasi yang belum teruji, serta rendahnya pemahaman evakuasi. Faktor data mencakup pemutakhiran penduduk, tata guna lahan, kontak pejabat, jalur evakuasi, dan keterbatasan data hidrologi jangka panjang.

Tabel 3. Ringkasan Fishbone Diagram dan kebutuhan pengendalian

Kategori	Penyebab dominan	Dampak pada RTD	Pengendalian yang dibutuhkan
Lingkungan	Hujan ekstrem, banjir besar, gempa	Peningkatan beban dan ketidakpastian kondisi	Pemantauan real-time, prakiraan, ambang status
Struktur/peralatan	Rembesan, deformasi, gangguan instrumen	Gejala abnormal terlambat dikenali	Redundansi instrumen dan inspeksi terarah
Metode	Prosedur belum teruji dan tidak terintegrasi	Keputusan dan peringatan terlambat	SOP berbasis status, simulasi, audit
Manusia/organisasi	Kompetensi dan koordinasi belum merata	Rantai komando tidak konsisten	Pelatihan, daftar tugas, pusat kendali
Data/material	Data penduduk, kontak, peta, dan akses berubah	Informasi evakuasi tidak mutakhir	Basis data digital dan pemutakhiran berkala

Penelusuran 5 Whys

Pertanyaan awal adalah: mengapa potensi korban jiwa dan kerugian tetap tinggi apabila terjadi kegagalan bendungan? Pertama, masyarakat hilir mungkin tidak memiliki waktu yang cukup untuk evakuasi. Kedua, informasi bahaya belum tentu diterima secara cepat dan merata. Ketiga, efektivitas penyebaran informasi bergantung pada koordinasi banyak lembaga dan media. Keempat, peringatan dan simulasi belum diuji secara rutin pada seluruh zona. Kelima, mekanisme kesiapsiagaan belum sepenuhnya terintegrasi dan belum memiliki bukti kinerja berkala.

Akar masalah dirumuskan sebagai belum optimalnya integrasi sistem kesiapsiagaan yang menghubungkan pemantauan bendungan, penilaian kondisi, kewenangan penetapan status, komunikasi antarinstansi, diseminasi peringatan, dan tindakan masyarakat. Rumusan ini penting karena solusi tidak dapat dibatasi pada penambahan sensor atau sirine. Perangkat tersebut hanya efektif apabila ambang keputusan, operator, rantai komunikasi, pesan, dan penerima peringatan telah ditetapkan dan diuji.

Diagnosis juga mengindikasikan adanya potensi ketergantungan pada personel tertentu. Bagan organisasi yang berisi nama dan nomor kontak mudah menjadi kedaluwarsa ketika terjadi rotasi jabatan. Oleh karena itu, RTD perlu menggabungkan pendekatan berbasis jabatan, fungsi, dan saluran komunikasi resmi, disertai daftar kontak dinamis sebagai lampiran yang lebih mudah diperbarui. Sistem harus tetap berjalan meskipun satu orang, satu jaringan, atau satu perangkat tidak tersedia.

Secara teoritis, hasil tersebut konsisten dengan konsep people-centered early warning system yang menempatkan pengetahuan risiko, pemantauan, komunikasi, dan kemampuan respons sebagai satu kesatuan (Marchezini, 2020). Dengan demikian, kinerja EWS ditentukan oleh kualitas hubungan antarkomponen, bukan oleh kualitas salah satu komponen secara terpisah.

Evaluasi Alternatif Solusi

Berdasarkan akar masalah, empat alternatif dirumuskan. Peningkatan pemantauan berfokus pada inspeksi dan pembacaan instrumen. Penguatan EWS mencakup sensor, ambang status, komunikasi, sirine, dan diseminasi multikanal. Simulasi dan pelatihan meningkatkan kompetensi petugas serta masyarakat. Digitalisasi RTD mempercepat pembaruan data dan distribusi informasi. Keempat alternatif saling melengkapi, tetapi diperlukan prioritas implementasi karena keterbatasan sumber daya.

Tabel 4. Weighted Decision Matrix alternatif peningkatan RTD

Alternatif	Efisiensi 30%	Biaya 20%	Keamanan 35%	Keberlanjutan 15%	Skor
Peningkatan pemantauan	3	4	3	3	3,25
Penguatan EWS	5	3	5	5	4,60
Simulasi dan pelatihan RTD	4	5	4	4	4,25
Digitalisasi RTD	4	4	4	4	4,00

Penguatan EWS memperoleh skor tertinggi 4,60. Nilai ini terutama dipengaruhi oleh kontribusi langsung pada keamanan dan kecepatan respons. EWS memungkinkan data pemantauan dikonversi menjadi status yang memicu tindakan, kemudian mengirimkan informasi kepada lembaga dan masyarakat melalui beberapa saluran. Investasi awal dan kebutuhan pemeliharaan lebih tinggi dibanding peningkatan inspeksi, tetapi dampaknya terhadap pengurangan konsekuensi lebih besar.

Simulasi dan pelatihan memperoleh skor 4,25. Alternatif ini relatif ekonomis dan penting untuk memastikan prosedur dipahami, tetapi tidak dapat menggantikan fungsi deteksi dan diseminasi. Digitalisasi RTD memperoleh skor 4,00 dan berperan sebagai enabler untuk pengelolaan data, dashboard kontak, peta, log keputusan, serta distribusi dokumen. Peningkatan pemantauan memperoleh skor 3,25; manfaatnya tinggi pada fase deteksi, tetapi efek terhadap evakuasi terbatas apabila tidak dihubungkan dengan EWS.

Interpretasi dan Sensitivitas Keputusan

Matriks keputusan digunakan sebagai alat transparansi, bukan sebagai pengganti penilaian ahli. Skor bergantung pada bobot dan asumsi. Apabila bobot biaya ditingkatkan secara ekstrem, simulasi dan pelatihan dapat mendekati atau melampaui EWS. Namun, untuk bendungan dengan klasifikasi bahaya sangat tinggi dan paparan penduduk besar, bobot keamanan 35% dipandang wajar. Prioritas EWS juga tidak berarti tiga alternatif lain ditinggalkan. Implementasi yang disarankan adalah paket bertahap: EWS sebagai tulang punggung, simulasi sebagai pengujian, pemantauan sebagai sumber data, dan digitalisasi sebagai infrastruktur informasi.

Tahap awal dapat memanfaatkan perangkat yang tersedia dengan memperjelas ambang status dan rantai komunikasi. Tahap berikutnya meliputi integrasi sensor, telemetri, sirine, radio, pesan seluler, dan dashboard. Tahap pematangan berfokus pada redundansi, audit reliabilitas, latihan lintas daerah, dan pemutakhiran peta berbasis perubahan tata ruang.

Desain Sistem Peringatan Dini Terintegrasi

Desain solusi menggunakan pendekatan systems engineering. Input sistem berupa data muka air waduk, curah hujan, debit, rembesan, deformasi, kondisi pelimpah dan intake, serta hasil inspeksi visual. Data diperiksa terhadap batas normal dan ambang tindakan. Apabila

ditemukan kondisi abnormal, tim teknis melakukan evaluasi, menetapkan status, dan mengaktifkan prosedur komunikasi sesuai RTD.



Gambar 3. Alur sistem peringatan dini terintegrasi Bendungan Meninting.

Gambar 3 memperlihatkan tujuh fungsi utama: pemantauan bendungan, deteksi kondisi abnormal, evaluasi kondisi, penetapan status, peringatan dini, koordinasi BPBD, dan evakuasi masyarakat. Rangkaian tersebut harus memiliki waktu target, penanggung jawab, bukti pencatatan, serta jalur eskalasi. Pemantauan tanpa ambang keputusan akan menambah data tetapi tidak menjamin tindakan; sebaliknya, peringatan tanpa dasar teknis dapat menurunkan kepercayaan masyarakat.

Prinsip Desain

Redundansi: data dan peringatan menggunakan lebih dari satu sensor, jaringan, dan mediakomunikasi. Fail-safe: kehilangan komunikasi atau indikator kritis tertentu harus memicu pemeriksaan dan eskalasi, bukan dianggap kondisi aman. Keterlacakan: setiap data,

keputusan, pesan, dan waktu aktivasi dicatat dalam log insiden. Interoperabilitas: format informasi dapat digunakan oleh pengelola, BPBD, pemerintah daerah, dan petugas lapangan. Berpusat pada masyarakat: pesan harus singkat, spesifik lokasi, menjelaskan tindakan, dan dapat diterima kelompok rentan. Perbaikan berkelanjutan: hasil pengujian, simulasi, dan kejadian aktual menjadi masukan pembaruan RTD.

Desain ini selaras dengan manajemen insiden yang menekankan kesamaan situasi, koordinasi, dan pengambilan keputusan berbasis informasi (International Organization for Standardization, 2018b). Untuk mengurangi alarm palsu, ambang status perlu mempertimbangkan kombinasi indikator, tren, dan konfirmasi lapangan. Namun, pada kondisi yang berkembang cepat, prosedur harus memberikan kewenangan aktivasi awal agar waktu peringatan tidak hilang karena proses administratif.

Status Kedaruratan, Komunikasi, dan Evakuasi

RTD menggunakan tingkatan waspada, siaga, dan awas. Setiap tingkatan harus diterjemahkan menjadi kombinasi kondisi teknis, tindakan operasional, pola komunikasi, dan respons masyarakat. Tabel 5 menyajikan rancangan operasional yang dapat disesuaikan kembali dengan kriteria resmi dan hasil kajian teknis bendungan.

Tabel 5. Kerangka tindakan berdasarkan status bendungan

Status	Indikasi umum	Tindakan pengelola	Komunikasi dan masyarakat
Waspada	Penyimpangan awal; masih dapat dikendalikan	Intensifikasi pemantauan, verifikasi data, kesiapan personel	Pemberitahuan internal dan lembaga teknis; siapkan sumber daya
Siaga	Kondisi memburuk; potensi kegagalan meningkat	Aktifkan posko, tindakan korektif, evaluasi berkelanjutan	Peringatan awal kepada daerah berisiko; persiapan/evakuasi zona prioritas
Awas	Kegagalan segera/terjadi atau tidak dapat dikendalikan	Aktivasi penuh RTD dan pelaporan berkelanjutan	Peringatan publik maksimal; evakuasi seluruh zona yang ditetapkan

Rantai Komunikasi

Rantai komunikasi melibatkan pengelola bendungan dan BBWS, ahli bendungan, unit pusat terkait, BPBD provinsi, BPBD Kabupaten Lombok Barat, BPBD Kota Mataram, kepala daerah, TNI/Polri, dinas teknis, kecamatan, desa/kelurahan, serta petugas lapangan. Agar rantai tidak terlalu panjang, perlu dibedakan antara komunikasi keputusan, komunikasi koordinasi, dan diseminasi publik. Pesan keputusan harus berasal dari sumber berwenang, sedangkan diseminasi dapat dilakukan secara paralel oleh beberapa lembaga setelah status dikonfirmasi.

Media peringatan yang disarankan meliputi sirine, radio komunikasi, telepon, pesan seluler, pengeras suara, mobil informasi, kanal media sosial resmi, dan jaringan relawan. Setiap zona perlu memiliki minimal dua media yang tidak bergantung pada infrastruktur yang sama. Misalnya, pesan seluler membutuhkan jaringan telekomunikasi, sedangkan sirine lokal dan radio dapat menjadi cadangan ketika jaringan padat atau terputus.

Desain Pesan Peringatan

Pesan harus menjawab lima pertanyaan: apa yang terjadi, wilayah mana yang terancam, kapan tindakan dilakukan, ke mana masyarakat bergerak, dan siapa sumber resmi. Istilah teknis seperti elevasi, rembesan, atau skenario keruntuhan tidak perlu mendominasi pesan publik. Konsistensi istilah dan warna status harus dijaga pada sirine, peta, papan informasi, materi sosialisasi, dan pesan digital. Penelitian peringatan berbasis masyarakat menunjukkan bahwa

kepercayaan dan pemahaman penerima merupakan bagian penting dari efektivitas EWS (Marchezini, 2020).

Evakuasi Berbasis Zona

Evakuasi harus mengikuti prioritas waktu tiba banjir dan kapasitas jalur. Kelompok rentan, fasilitas kesehatan, sekolah, dan permukiman dengan akses terbatas perlu memiliki rencana khusus. Simulasi tidak cukup hanya menguji pergerakan masyarakat; simulasi harus mengukur waktu keputusan, waktu pengiriman pesan, waktu penerimaan, waktu keberangkatan, titik kemacetan, dan waktu mencapai tempat aman.

Tahapan Implementasi

Implementasi disusun dalam enam tahap. Pertama, tahap persiapan melalui verifikasi data genangan, penduduk, jalur evakuasi, titik aman, struktur organisasi, dan seluruh saluran komunikasi. Kedua, tahap pemantauan dengan meningkatkan inspeksi visual, pembacaan instrumen, evaluasi muka air, curah hujan, rembesan, deformasi, pelimpah, dan intake. Ketiga, tahap penetapan status berdasarkan evaluasi teknis dan ambang yang telah disepakati.

Keempat, tahap penyampaian informasi melalui pusat kendali dan bagan komunikasi RTD. Kelima, tahap evakuasi yang dikoordinasikan BPBD dengan dukungan pemerintah daerah, aparat keamanan, dinas teknis, kecamatan, desa, dan masyarakat. Keenam, tahap evaluasi pascasimulasi atau pascakejadian untuk mengidentifikasi kegagalan komunikasi, keterlambatan, ketidaksesuaian data, dan kebutuhan perbaikan.



Gambar 4. Dokumentasi inspeksi lapangan dan koordinasi teknis dalam evaluasi RTD. Paket Implementasi Prioritas

Tabel 6. Paket implementasi bertahap

Horizon	Kegiatan prioritas	Keluaran utama
0–6 bulan	Audit RTD; pembaruan kontak; verifikasi peta dan jalur; uji komunikasi; penetapan indikator kinerja	RTD mutakhir dan baseline kesiapsiagaan
6–18 bulan	Integrasi telemetri; perbaikan sirine/radio; dashboard; simulasi zona prioritas; pelatihan operator	EWS minimum yang teruji
18–36 bulan	Redundansi jaringan; perluasan cakupan; simulasi penuh; audit independen; evaluasi berbasis data	EWS terintegrasi dan andal
Berkelanjutan	Pemeliharaan, pembaruan data, latihan, review pascakejadian, pelaporan kinerja	Continuous improvement

Paket bertahap memungkinkan perbaikan dimulai tanpa menunggu seluruh investasi teknologi. Kejelasan peran, pembaruan data, dan uji komunikasi merupakan tindakan berbiaya relatif rendah tetapi berdampak langsung. Integrasi perangkat dilakukan setelah prosedur dan kebutuhan informasi dipastikan, sehingga teknologi tidak berdiri sendiri.

Setiap kegiatan perlu memiliki pemilik proses, anggaran, jadwal, bukti uji, dan kriteria penerimaan. Contoh kriteria meliputi persentase sensor aktif, keberhasilan pengiriman pesan, cakupan keterdengaran sirine, waktu aktivasi, persentase petugas yang merespons, serta waktu evakuasi tiap zona.

Verifikasi dan Validasi Solusi

Verifikasi dilakukan dengan membandingkan kondisi prosedural sebelum dan sesudah penguatan RTD. Validasi dilakukan melalui telaah kesesuaian dengan prinsip keamanan bendungan, manajemen risiko, manajemen insiden, dan simulasi koordinasi antarpemangku kepentingan. Hasilnya bersifat kualitatif karena belum tersedia data pengukuran kinerja lapangan yang lengkap.

Tabel 7. Perbandingan kondisi sebelum dan sesudah penguatan RTD

Indikator	Sebelum	Sesudah penguatan	Status
Pemantauan	Rutin terbatas	Lebih intensif dan terarah	Meningkat
Deteksi abnormal	Belum terstruktur	Prosedur evaluasi tersedia	Meningkat
Pelaporan	Koordinasi terbatas	Bagan alir RTD diterapkan	Meningkat
Koordinasi	Belum terintegrasi	Peran dan mekanisme lebih jelas	Meningkat
Peringatan dini	Media/prosedur terbatas	Diseminasi multikanal dirancang	Meningkat
Kesiapsiagaan masyarakat	Rendah	Sosialisasi dan simulasi direncanakan/dilakukan	Meningkat
Jalur evakuasi	Belum dipahami merata	Jalur dan lokasi aman ditetapkan	Meningkat
Pengambilan keputusan	Relatif lambat	Lebih cepat dan terstruktur	Meningkat

VERIFIKASI DAN VALIDASI SOLUSI				
Perbandingan Kondisi Sebelum dan Sesudah Implementasi Sistem Peringatan Dini dan Rencana Tindak Darurat (RTD) Bendungan Meninting				
NO	INDIKATOR EVALUASI	SEBELUM IMPLEMENTASI	SESUDAH IMPLEMENTASI	HASIL / KETERANGAN
1	 Pemantauan kondisi bendungan	• Bersifat rutin terbatas, interval pemantauan lebih jarang, data tidak terintegrasi.	• Pemantauan lebih intensif dan terintegrasi (muka air, curah hujan, rembesan, instrumen).	✓ MENINGKAT Deteksi dini lebih cepat dan akurat.
2	 Deteksi kondisi abnormal	• Belum terstruktur, bergantung pada pengalaman petugas.	• Prosedur deteksi dan evaluasi kondisi abnormal tersedia dan terdokumentasi.	✓ MENINGKAT Identifikasi risiko lebih cepat dan terukur.
3	 Sistem pelaporan dan informasi	• Koordinasi terbatas, jalur informasi belum baku.	• Bagan alir RTD diterapkan, jalur informasi jelas dan terstandar.	✓ MENINGKAT Informasi tersampaikan lebih cepat dan tepat.
4	 Koordinasi antarinstansi	• Belum terintegrasi, komunikasi belum rutin.	• Mekanisme koordinasi rutin melalui Pos Komando Operasi Tanggap Darurat.	✓ MENINGKAT Koordinasi lebih efektif dan responsif.
5	 Sistem peringatan dini	• Sarana terbatas (manual), penyebaran informasi lambat.	• Peringatan dini multi-kanal (sirine, WA grup, radio, SMS blast, mobil keliling).	✓ MENINGKAT Penyebaran peringatan lebih cepat dan luas.
6	 Kesiapsiagaan masyarakat	• Pemahaman rendah, belum pernah ada simulasi.	• Sosialisasi rutin dan simulasi dilaksanakan secara berkala.	✓ MENINGKAT Masyarakat lebih siap dan tanggap.
7	 Jalur evakuasi dan lokasi pengungsian	• Belum dipahami masyarakat, penanda jalur belum tersedia.	• Jalur evakuasi ditetapkan, rambu terpasang, lokasi pengungsian siap.	✓ MENINGKAT Evakuasi lebih aman dan terarah.
8	 Waktu pengambilan keputusan	• Relatif lebih lambat karena informasi tidak terstruktur.	• Lebih cepat berkat prosedur baku dan informasi real-time.	✓ MENINGKAT Keputusan lebih cepat dan tepat.
 KESIMPULAN Implementasi sistem peringatan dini yang terintegrasi dengan RTD Bendungan Meninting terbukti meningkatkan efektivitas pemantauan, koordinasi, komunikasi, dan kesiapsiagaan masyarakat dalam menghadapi kondisi darurat.		 MASALAH UTAMA DAPAT DIMINIMALKAN		

Gambar 5. Ringkasan verifikasi dan validasi solusi penguatan EWS dan RTD.

Peningkatan terbesar terlihat pada struktur proses: data pemantauan memiliki jalur evaluasi, status memiliki pemicu komunikasi, dan komunikasi memiliki tujuan respons. Keterhubungan ini mengurangi ruang interpretasi pada saat darurat. Validasi juga menunjukkan bahwa solusi selaras dengan prinsip pencegahan, kesiapsiagaan, koordinasi insiden, serta perlindungan publik.

Indikator Kinerja yang Direkomendasikan

Untuk mengubah verifikasi kualitatif menjadi evaluasi kuantitatif, perlu ditetapkan indikator: waktu dari deteksi ke konfirmasi, waktu dari konfirmasi ke penetapan status, waktu dari status ke aktivasi peringatan, persentase penerima pesan, jangkauan sirine, ketersediaan sistem, persentase sensor valid, waktu evakuasi per zona, dan persentase masyarakat yang memahami pesan. Data tersebut harus dicatat pada setiap uji dan dibandingkan dengan target.

Pembahasan Kritis

Pemilihan EWS sebagai prioritas menunjukkan bahwa pengelolaan konsekuensi sama pentingnya dengan pencegahan kegagalan. Upaya struktural menjaga bendungan tetap aman, sedangkan EWS dan RTD membatasi dampak apabila kondisi tidak normal berkembang. Kedua lapisan harus berjalan bersama. Penelitian terdahulu memperlihatkan bahwa waktu peringatan dan kemampuan evakuasi berpengaruh besar terhadap risiko korban (Maranzoni et al., 2024); (Ferrari et al., 2023); (Ge et al., 2022); (Silva & Eleutério, 2023). Oleh karena itu, kualitas sistem harus dinilai berdasarkan lead time yang dapat digunakan masyarakat, bukan hanya kecepatan sensor mendeteksi anomali.

Pendekatan yang diusulkan juga menekankan bahwa EWS adalah sistem sosio-teknis. Tantangan bukan hanya reliabilitas perangkat, tetapi juga kewenangan, pemutakhiran daftar kontak, konsistensi pesan, kepercayaan masyarakat, akses kelompok rentan, dan latihan.

Sistem yang canggih dapat gagal apabila keputusan tertunda; sebaliknya, organisasi yang siap tetap memerlukan data yang akurat untuk mencegah keputusan yang salah.

EVALUASI ASPEK K3L DAN ETIKA KEINSINYURAN Implementasi Sistem Peringatan Dini dan RTD Bendungan Meninting					
NO	ASPEK	POTENSI RISIKO	DAMPAK	TINDAKAN MITIGASI	ACUAN / REGULASI
1	Keselamatan Kerja (K3)	Kecelakaan saat inspeksi bendungan	Cedera petugas	- Penggunaan APD - Briefing K3 sebelum bekerja - SOP pekerjaan lapangan	SMK3 dan SOP Operasi
2	Keselamatan Kerja (K3)	Terpeleset atau jatuh pada area lereng dan spillway	Kecelakaan kerja	- Pengamanan area kerja - Pengawasan lapangan - Pemasangan rambu K3	SOP K3 Bendungan
3	Lingkungan	Erosi dan sedimentasi	Penurunan kualitas lingkungan	- Pengendalian sedimentasi - Rehabilitasi/konservasi lahan - Vegetasi penahan erosi	Prinsip Pengelolaan Lingkungan
4	Lingkungan	Gangguan kualitas air	Penurunan kualitas air waduk	- Monitoring kualitas air - Pengendalian limbah/aktivitas - Pemeliharaan area tangkapan air	Regulasi Lingkungan Hidup
5	Sosial & Keselamatan Publik	Keterlambatan evakuasi masyarakat	Risiko korban jiwa dan kerugian	- Sistem peringatan dini multi-kanal - Simulasi evakuasi secara berkala - Sosialisasi kepada masyarakat	Dokumen RTD
6	Etika Keinsinyuran	Pengambilan keputusan tanpa data teknis	Keputusan tidak tepat/salah	- Analisis berbasis data & kaidah teknik - Verifikasi dan validasi data - Review oleh tim ahli	Kode Etik PII
7	Etika Keinsinyuran	Kurangnya transparansi informasi	Menurunnya kepercayaan publik	- Koordinasi & komunikasi terbuka - Penyampaian informasi yang akurat - Pelaporan berkala	UU No. 11 Tahun 2014 tentang Keinsinyuran
8	Profesionalisme	Keterlambatan pelaporan kondisi darurat	Penanganan tidak optimal	- Mekanisme pelaporan berjenjang - SOP komunikasi darurat - Pemantauan 24/7	RTD Bendungan
9	Keberlanjutan	Tidak adanya evaluasi berkala	Penurunan efektivitas sistem	- Audit & evaluasi berkala - Pembinaan dokumen RTD - Simulasi dan perbaikan berkelanjutan	Good Engineering Practice (GEP)
RINGKASAN HASIL EVALUASI					
INDIKATOR	SEBELUM IMPLEMENTASI	SEKUALAH IMPLEMENTASI	KESIMPULAN	KESIMPULAN UMUM	
Keselamatan Petugas	Sedang	Rendah	✓ Risiko menurun		
Keselamatan Masyarakat	Tinggi	Rendah	✓ Risiko menurun		
Dampak Lingkungan	Sedang	Rendah	✓ Risiko menurun		
Risiko Etika Profesi	Sedang	Rendah	✓ Risiko menurun		
Koordinasi Antarinstansi	Tinggi	Rendah	⬆️ Kinerja meningkat	Implementasi sistem peringatan dini dan RTD Bendungan Meninting telah dilakukan dengan memperhatikan aspek K3L dan etika keinsinyuran, sehingga meningkatkan keselamatan kerja, melindungi lingkungan, menjaga keselamatan masyarakat, dan sesuai dengan kode etik serta regulasi yang berlaku.	
Kepatuhan Regulasi	Sedang	Tinggi	⬆️ Kepatuhan meningkat		

Gambar 6. Evaluasi aspek keselamatan, kesehatan kerja, lingkungan, dan etika keinsinyuran.

Aspek K3L dan Etika Keinsinyuran

Implementasi RTD harus memenuhi keselamatan dan kesehatan kerja petugas, perlindungan masyarakat, serta pengendalian dampak lingkungan. Petugas inspeksi dan operator wajib bekerja dengan prosedur akses aman, alat pelindung diri, komunikasi lapangan, dan pembatasan area berbahaya. Pada fase evakuasi, pengaturan lalu lintas, pertolongan pertama, pengamanan fasilitas publik, dan perlindungan kelompok rentan menjadi bagian dari sistem.

Dari sisi lingkungan, tindakan darurat perlu mempertimbangkan pelepasan air, erosi, sedimentasi, pencemaran, dan pengelolaan lokasi pengungsian. Dari sisi etika, keputusan harus memprioritaskan keselamatan publik, berbasis data, terdokumentasi, dan bebas dari penundaan yang tidak dapat dipertanggungjawabkan. Prinsip tersebut sejalan dengan Undang-Undang Keinsinyuran dan Kode Etik Insinyur Indonesia (Pemerintah Republik Indonesia, 2014), (Persatuan Insinyur Indonesia, 2021).

Keterbatasan dan Agenda Penelitian

Keterbatasan utama adalah belum adanya uji integrasi penuh dan data kuantitatif lead time. Peta genangan yang digunakan juga perlu dievaluasi secara berkala terhadap perubahan tata guna lahan, jaringan jalan, dan distribusi penduduk. Penelitian lanjutan disarankan mencakup pemodelan waktu tiba banjir per zona, analisis kapasitas jalur dan tempat evakuasi, uji keterdengaran sirine, simulasi siang-malam, serta analisis reliabilitas komunikasi. Pendekatan probabilistik dapat digunakan untuk memperhitungkan ketidakpastian bahaya, paparan, dan kerentanan (Maranzoni et al., 2024).

SIMPULAN

Bendungan Meninting memiliki konsekuensi kegagalan yang sangat tinggi karena potensi genangan sekitar 2.997 ha mencakup wilayah berpenduduk 130.976 jiwa. Analisis

Fishbone Diagram dan 5 Whys menunjukkan bahwa akar masalah kesiapsiagaan terletak pada belum optimalnya integrasi pemantauan, evaluasi kondisi, penetapan status, komunikasi, koordinasi lintas lembaga, dan kemampuan respons masyarakat.

Weighted Decision Matrix menempatkan penguatan Early Warning System sebagai alternatif prioritas dengan skor 4,60, diikuti simulasi dan pelatihan RTD 4,25, digitalisasi RTD 4,00, dan peningkatan pemantauan 3,25. EWS yang dipilih bukan sistem perangkat tunggal, melainkan arsitektur yang menghubungkan data bendungan, deteksi abnormal, status waspada-siaga-awas, komunikasi berjenjang, diseminasi multikanal, dan evakuasi berbasis zona.

Verifikasi dokumen dan simulasi koordinasi menunjukkan peningkatan kualitatif pada pemantauan, deteksi, pelaporan, koordinasi, peringatan, kesiapsiagaan, jalur evakuasi, dan pengambilan keputusan. Klaim efektivitas lapangan tetap memerlukan pengukuran waktu deteksi, waktu aktivasi, jangkauan peringatan, reliabilitas sistem, dan waktu evakuasi. Implementasi disarankan dilakukan secara bertahap, disertai pemutakhiran data, simulasi rutin, audit, pemeliharaan, dan perbaikan berkelanjutan.

Adapun rekomendasi prioritas jangka pendek adalah mengaudit RTD, memperbarui kontak dan data penduduk, memverifikasi peta serta jalur evakuasi, menetapkan indikator kinerja, dan menguji seluruh saluran komunikasi. Jangka menengah diarahkan pada integrasi telemetri, sirine, radio, pesan digital, dashboard, dan simulasi berbasis zona. Jangka panjang mencakup redundansi sistem, pemodelan risiko yang diperbarui, audit independen, dan latihan penuh lintas Kabupaten Lombok Barat–Kota Mataram.

DAFTAR PUSTAKA

- Pengelola Bendungan Meninting. (2022). Rencana Tindak Darurat Bendungan Meninting. Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara I.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2010). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2010 tentang Bendungan.
- Kementerian PUPR. (2015). Peraturan Menteri PUPR Nomor 27/PRT/M/2015 tentang Bendungan.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2019). Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air.
- International Organization for Standardization. (2018). ISO 31000:2018 Risk management—Guidelines.
- International Organization for Standardization. (2018). ISO 22320:2018 Security and resilience—Emergency management—Guidelines for incident management.
- Balai Bendungan. (2013). Pedoman teknis penyusunan rencana tindak darurat bendungan.
- Rodrigues, A. S., Santos, M. A., Santos, A. D., & Rocha, F. (2002). Dam-break flood emergency management system. *Water Resources Management*, 16, 489–503.
- Marchezini, V. (2020). What is a sociologist doing here? An unconventional people-centered approach to improve warning implementation in the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction. *International Journal of Disaster Risk Science*, 11(2), 218–229.
- Maranzoni, A., D'Oria, M., & Rizzo, C. (2024). Probabilistic mapping of life loss due to dam-break flooding. *Natural Hazards*, 120, 2433–2460.
- Ferrari, A., Vacondio, A., & Mignosa, P. (2023). High-resolution 2D shallow water modelling of dam failure floods for emergency action plans. *Journal of Hydrology*, 618, 129192.
- Ge, W., et al. (2022). Estimating loss of life caused by dam breaches based on the simulation of flood routing and evacuation potential of population at risk. *Journal of Hydrology*, 612, 128059.
- Silva, A. F. R., & Eleutério, J. C. (2023). Effectiveness of a dam-breach flood alert in mitigating life losses: A spatiotemporal sectorisation analysis in a high-density urban area in Brazil. *Water*, 15(19), 3433.
- Jonkman, S. N., & Vrijling, J. K. (2008). Loss of life due to floods. *Journal of Flood Risk Management*, 1(1), 43–56.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2014). Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2014 tentang Keinsinyuran. Persatuan Insinyur Indonesia. (2021). Kode Etik Insinyur Indonesia.