



Evaluasi Terintegrasi Rembesan dan Stabilitas Bendungan Raknamo: Perbandingan SEEP/W–V-Notch dan Respons terhadap Skenario Pembebanan

Rizal Akri Boik¹, Indradhi Lasmana², Amandus Jong Tallo^{3*}

^{1,2,3}Program Studi Teknik Perancangan Irigasi dan Penanganan Pantai, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Kupang, Indonesia

¹akriboik@gmail.com, ²indraarieadeina@gmail.com, ³*amandustallo@gmail.com,

*) amandustallo@gmail.com

Abstrak– Evaluasi keamanan bendungan memerlukan pembacaan terpadu antara hasil pemodelan dan monitoring lapangan dengan memperhatikan kesetaraan domain yang diamati. Penelitian ini mengevaluasi rembesan Bendungan Raknamo pada dua keadaan muka air, 99,68 mdpl dan 104,18 mdpl, serta stabilitas lereng pada kondisi statik, Operating Basis Earthquake (OBE), Maximum Design Earthquake (MDE), dan rapid drawdown. SEEP/W menghasilkan debit per satuan lebar sebesar $3,0587 \times 10^{-6}$ dan $4,2983 \times 10^{-6}$ m³/dtk/m. Nilai ekuivalen yang diperoleh dengan penskalaan panjang bendungan adalah 0,001376 dan 0,001933 m³/dtk, sedangkan V-notch mencatat 0,00360 dan 0,00992 m³/dtk. Karena keseragaman longitudinal penampang dan kesetaraan daerah tangkapan V-notch tidak dapat dibuktikan, kedua kelompok debit tidak diperlakukan sebagai besaran yang ekuivalen untuk validasi atau perhitungan galat model. Hasil V-notch hanya digunakan sebagai informasi monitoring operasional yang berdiri berdampingan dengan keluaran model. Faktor keamanan SLOPE/W berkisar 2,082–2,504 pada kondisi statik, 1,888–2,068 pada OBE, dan 1,257–1,400 pada MDE. Dua hasil MDE pada lereng hulu, yaitu FK 1,259 pada 99,68 mdpl dan 1,257 pada 104,18 mdpl, dipandang praktis setara pada presisi pelaporan yang tersedia karena tidak dilakukan analisis sensitivitas atau ketidakpastian. Rapid drawdown selama 18 jam menghasilkan FK akhir 2,417; nilai minimum sepanjang riwayat transien tidak tersedia. Studi ini menunjukkan manfaat pembacaan terpisah tetapi saling melengkapi antara monitoring rembesan dan pemeringkatan respons stabilitas, sekaligus menegaskan batas inferensi ketika metadata monitoring dan arsip model numerik tidak lengkap.

Kata Kunci: rembesan bendungan, perbandingan model–monitoring, V-notch, SEEP/W, SLOPE/W, MDE

Abstract– Dam-safety assessment requires integrated interpretation of numerical outputs and field monitoring while recognizing whether the compared observations represent equivalent flow domains. This study evaluates seepage at Raknamo Dam for two reservoir states, 99.68 and 104.18 m above sea level, together with slope stability under static, Operating Basis Earthquake (OBE), Maximum Design Earthquake (MDE), and rapid-drawdown conditions. SEEP/W yielded unit-width discharges of 3.0587×10^{-6} and 4.2983×10^{-6} m³/s/m. Scaling by the dam length produced section-equivalent values of 0.001376 and 0.001933 m³/s, whereas V-notch monitoring recorded 0.00360 and 0.00992 m³/s. Because longitudinal uniformity and equivalence between the modeled section and the V-notch catchment cannot be demonstrated, these quantities are not treated as equivalent observations for model validation or error estimation. V-notch data are therefore reported as independent operational monitoring evidence alongside the numerical outputs. SLOPE/W safety factors ranged from 2.082–2.504 under static conditions, 1.888–2.068 under OBE, and 1.257–1.400 under MDE. The two upstream MDE results, 1.259 at 99.68 m and 1.257 at 104.18 m, are considered practically indistinguishable at the available reporting precision because no sensitivity or uncertainty analysis was performed. The final rapid-drawdown condition after 18 h yielded a safety factor of 2.417, while the minimum factor of safety during the transient history is unavailable. The study demonstrates the value of complementary, but explicitly non-equivalent, monitoring and modeling evidence and clarifies the inference limits imposed by incomplete monitoring metadata and archived numerical-model information.

Keywords: dam seepage, model–monitoring comparison, V-notch, SEEP/W, SLOPE/W, MDE

1. PENDAHULUAN

Bendungan merupakan infrastruktur sumber daya air yang berperan dalam penyimpanan air, penyediaan air baku, irigasi, dan pengendalian banjir [1], [2], [3]. Konsekuensi kegagalan bendungan dapat berdampak besar terhadap masyarakat dan infrastruktur di hilir, evaluasi keamanan geoteknik perlu dilakukan sepanjang umur layan



bendungan [4]. Pada bendungan urugan, rembesan dan stabilitas lereng merupakan dua aspek yang saling berhubungan karena aliran melalui tubuh dan pondasi bendungan memengaruhi tekanan air pori serta kondisi kuat geser material [5].

Rembesan yang tidak terkendali dapat meningkatkan kehilangan air dan, pada kondisi tertentu, berkaitan dengan erosi internal atau piping [6],[7] dan pada umumnya rembesan sulit diprediksi secara akurat [8]. Pemantauan lapangan menggunakan instrumen seperti V-notch dan piezometer telah digunakan untuk mengevaluasi perilaku rembesan aktual pada bendungan[9], [10],[11]. Di sisi lain, analisis numerik memungkinkan distribusi aliran dan faktor keamanan dievaluasi pada berbagai kondisi muka air dan pembebanan. Aliran rembesan dalam hal tertentu dapat diizinkan terjadi pada bendungan, namun pada kondisi tertentu dapat menimbulkan terjadinya erosi internal yang menginisiasi terbentuknya piping [12]. SEEP/W telah digunakan untuk analisis rembesan bendungan urugan [13], sedangkan SLOPE/W menyediakan pendekatan keseimbangan batas untuk evaluasi kestabilan lereng [14],[15].

Dalam konteks Kabupaten Kupang yang memiliki pola curah hujan musiman, kualitas evaluasi infrastruktur air tidak cukup dinilai dari keberadaan aset, tetapi juga dari indikator kinerja dan kondisi operasional. Penilaian jaringan irigasi air tanah di Nunkurus, Kabupaten Kupang, perlu berbasis indikator operasi dan pemeliharaan sebagai salah satu contoh [16]. Prinsip evaluasi berbasis kinerja tersebut relevan untuk Bendungan Raknamo, terutama ketika keluaran model numerik perlu dibaca bersama dengan data monitoring aktual. Bendungan Raknamo merupakan bendungan urugan zonal dengan inti tegak di Kabupaten Kupang, Nusa Tenggara Timur. Bendungan memiliki tinggi 37 m, panjang puncak 449,75 m, lebar puncak 10 m, serta kemiringan lereng hulu dan hilir 1:2,5. Berdasarkan dokumen sertifikasi bendungan, kapasitas tampungan totalnya sekitar 14,70 juta m³ [17]. Struktur zonal terdiri atas material inti, filter halus, filter kasar, material random, dan riprap, sesuai prinsip zonasi material pada bendungan urugan [18].

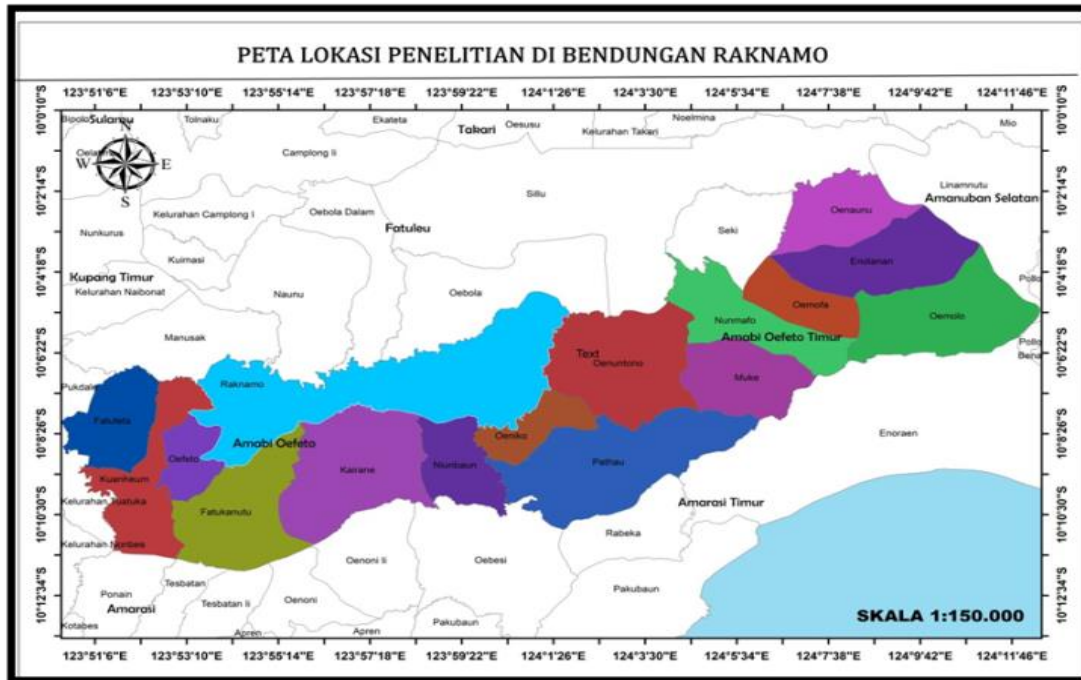
Penelitian terdahulu menggunakan beragam pendekatan untuk mengevaluasi keamanan bendungan. Pemantauan V-notch dan piezometer digunakan untuk menilai rembesan [9], sedangkan pemodelan SEEP/W dan *flownet* digunakan untuk menganalisis pola aliran [13]. Penelitian lain mengintegrasikan analisis rembesan dan stabilitas lereng pada kondisi surut cepat serta gempa [19], sementara simulasi laboratorium digunakan untuk menguji pengaruh tinggi hidrostatik terhadap rembesan [20]. Perbedaan pendekatan tersebut menjadi dasar untuk membaca hasil model dan data pemantauan secara berdampingan, dengan tetap memeriksa kesetaraan daerah alir sebelum keduanya digunakan untuk validasi. Untuk kondisi surut cepat, stabilitas dipengaruhi tidak hanya oleh besarnya penurunan muka air, tetapi juga oleh permeabilitas, rasio, dan laju drawdown [21].

Berdasarkan celah tersebut, kontribusi penelitian ini diletakkan pada evaluasi terpadu yang secara eksplisit memisahkan fungsi bukti model dan monitoring. Keluaran SEEP/W digunakan untuk menggambarkan respons rembesan pada penampang 2D, sedangkan V-notch diperlakukan sebagai indikator operasional debit yang tertangkap sistem monitoring tanpa diasumsikan memiliki control volume yang identik. Selanjutnya, respons stabilitas pada kondisi statik, OBE, MDE, dan rapid drawdown dibandingkan terhadap kriteria minimum tanpa menyatakan perbedaan yang sangat kecil sebagai peringkat kritis yang pasti. Tujuan penelitian adalah mendeskripsikan respons rembesan model pada dua muka air; menyajikan data V-notch sebagai bukti monitoring pendamping dengan batas komparabilitas yang jelas; dan mengevaluasi rentang respons stabilitas terhadap skenario pembebanan yang dianalisis.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Lokasi dan Karakteristik Bendungan

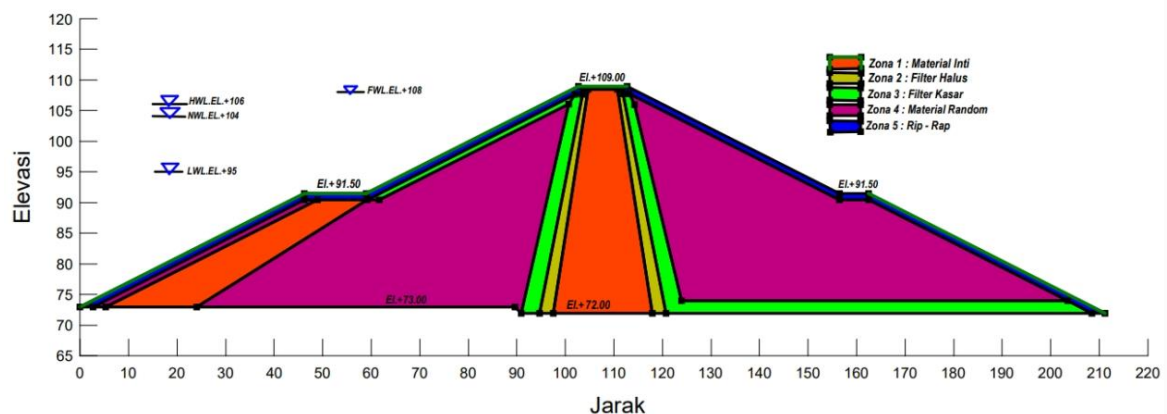
Penelitian dilakukan pada Bendungan Raknamo di Desa Raknamo, Kecamatan Amabi Oefeto, Kabupaten Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Data teknis dan parameter material diperoleh dari dokumen Bendungan Raknamo serta Balai Besar Wilayah Sungai Nusa Tenggara II [17]. Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta lokasi Bendungan Raknamo

Sumber: data penelitian dan pemetaan ArcGIS

Gambar 1 menunjukkan lokasi Bendungan Raknamo di Desa Raknamo, Kecamatan Amabi Oefeto, Kabupaten Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Lokasi tersebut menjadi objek evaluasi karena penelitian menggunakan data teknis bendungan, hasil monitoring lapangan, dan parameter material yang berkaitan langsung dengan kondisi Bendungan Raknamo. Bendungan Raknamo merupakan bendungan timbunan zonal dengan inti tegak. Gambar 2 memperlihatkan konfigurasi penampang bendungan urugan zonal yang digunakan sebagai dasar pemodelan. Pembagian material ke dalam zona inti, filter halus, filter kasar, material random, dan riprap memungkinkan parameter hidraulik dan mekanik diterapkan sesuai karakteristik masing-masing zona pada analisis SEEP/W dan SLOPE/W. Material penyusun tubuh bendungan dibagi menjadi lima zona, yaitu inti, filter halus, filter kasar, material random, dan riprap [17].



Gambar 2. Penampang melintang Bendungan Raknamo

Sumber: Data geometri Bendungan Raknamo [17]

2.2 Data dan Parameter Material

Data primer terdiri atas elevasi muka air waduk yang dibaca melalui Automatic Water Level Recorder (AWLR) dan debit rembesan yang dihitung dari pembacaan V-notch. Arsip monitoring yang tersedia hanya memuat dua

pasangan elevasi–debit V-notch tahun 2024, yaitu 99,68 mdpl–3,60 L/dtk dan 104,18 mdpl–9,92 L/dtk. Nilai head mentah pada ambang V-notch, tanggal dan jam pengukuran, jumlah pengulangan, catatan kalibrasi, ketidakpastian instrumen, curah hujan antecedent, dan waktu tunda respons rembesan tidak tersedia dalam arsip yang digunakan. Karena itu, debit V-notch tidak direkonstruksi ulang dari head mentah dan hanya digunakan sebagai dua snapshot monitoring operasional. Data sekunder meliputi geometri bendungan, parameter material hasil pengujian laboratorium, dokumen sertifikasi, dan data kegempaan Indonesia 2017 [17],[22]. Pada Tabel 1, WC didefinisikan sebagai volumetric water content (kadar air volumetrik) tanpa satuan. Tabel 1 menunjukkan bahwa setiap zona timbunan memiliki karakteristik hidraulik dan mekanik yang berbeda. Zona inti memiliki nilai permeabilitas paling rendah sehingga berfungsi sebagai elemen utama pengendali rembesan, sedangkan zona filter dan material lain mempunyai permeabilitas lebih tinggi sesuai fungsi drainase dan transisi material. Variasi kohesi dan sudut geser dalam selanjutnya digunakan sebagai parameter utama dalam analisis kestabilan lereng.

Tabel 1. Parameter utama material timbunan Bendungan Raknamo

Parameter	Inti Zona 1	Filter Halus Zona 2	Filter Kasar Zona 3	Random Zona 4	Riprap Zona 5
γ_{sat} (t/m ³)	1,85	1,95	1,90	2,15	1,95
c (t/m ²)	0,36	0,03	0	1,54	0
ϕ (°)	17,47	30	27	35	36
k (m/dtk)	$1,19 \times 10^{-7}$	$8,00 \times 10^{-6}$	$1,83 \times 10^{-4}$	$5,28 \times 10^{-5}$	$8,00 \times 10^{-1}$
WC, kadar air volumetrik (-)	0,2688	0,3271	0,3654	0,4112	0,4763

Sumber: Laporan Akhir Sertifikasi Bendungan Raknamo [17].

2.3 Pemodelan Rembesan dan Perbandingan Diagnostik V-Notch

Analisis rembesan dilakukan dengan SEEP/W pada penampang utama dua dimensi. Elevasi hulu 99,68 mdpl dan 104,18 mdpl digunakan sebagai kondisi head pada sisi waduk, sedangkan zonasi material mengikuti penampang dan parameter permeabilitas pada Tabel 1. Keluaran yang dapat ditelusuri dari dokumen sumber adalah debit per satuan lebar q (m³/dtk/m) dan distribusi tekanan air pori. Berkas proyek GeoStudio asli tidak tersedia, sehingga ukuran dan topologi mesh, toleransi konvergensi, implementasi kondisi batas hilir, fungsi hidraulik jenuh/tak jenuh, kondisi awal, serta parameter hidraulik pondasi tidak dapat diaudit atau direplikasi secara independen. Konsekuensinya, hasil numerik pada artikel ini diperlakukan sebagai keluaran model arsip dan tidak digunakan untuk mengklaim reproduksibilitas solver atau kalibrasi hidraulik.

Untuk konsistensi dengan perhitungan pada penelitian asal, debit per satuan lebar juga ditampilkan sebagai nilai ekuivalen $Q_2D = q \times L$ dengan $L = 449,75$ m, yaitu panjang puncak bendungan. Penskalaan ini merupakan asumsi geometrik orde pertama, bukan integrasi aliran tiga dimensi. Tidak tersedia bukti bahwa karakteristik rembesan seragam sepanjang 449,75 m, dan tidak tersedia delineasi daerah tangkapan V-notch yang menunjukkan bahwa seluruh kontribusi yang terukur berasal dari control volume yang sama dengan penampang 2D. Oleh sebab itu, Q_2D tidak digunakan untuk menghitung error, rasio validasi, atau koefisien kalibrasi terhadap V-notch. Nilai Q_2D hanya dipertahankan untuk keterlacakan terhadap perhitungan sumber, sedangkan q merupakan keluaran fisik langsung model 2D. V-notch pada penelitian asal berupa ambang V 90° dan debit dinyatakan dihitung dengan persamaan Thomson $Q = 0,01365 h^{5/2}$, dengan Q dalam liter/detik dan h dalam liter sentimeter. Arsip yang tersedia hanya memuat debit akhir 3,60 L/dtk pada elevasi 99,68 mdpl dan 9,92 L/dtk pada elevasi 104,18 mdpl; head mentah h tidak tersedia sehingga perhitungan tidak dapat diverifikasi ulang. Metadata pengukuran lain—waktu pengamatan, pengulangan, kalibrasi, ketidakpastian pembacaan, kondisi hujan sebelumnya, dan lag hidraulik—juga tidak tersedia. Kedua data karena itu diperlakukan sebagai snapshot monitoring, bukan deret waktu dan bukan pasangan validasi satu-ke-satu untuk SEEP/W.

2.4 Klasifikasi Risiko, Beban Gempa, dan Stabilitas Lereng

Klasifikasi risiko bendungan dihitung dari faktor kapasitas tampungan (FR_k), tinggi bendungan (FR_t), kebutuhan evakuasi (FR_e), dan tingkat kerusakan hilir (FR_h) berdasarkan Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa [23], dengan $FR_{total} = FR_k + FR_t + FR_e + FR_h$. Nilai FR_{total} digunakan untuk menetapkan periode ulang OBE dan MDE.

Parameter kegempaan mengikuti perhitungan sumber yang mengacu pada Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia 2017 [22] dan pedoman [23]. Simbol yang digunakan adalah Z sebagai koefisien/zona bahaya gempa, Ac sebagai parameter percepatan dasar untuk periode ulang terpilih, V sebagai faktor koreksi kondisi tanah, dan $Ad = Z \times Ac \times V$ sebagai percepatan terkoreksi dalam sistem satuan perhitungan sumber. Koefisien pseudo-statik kemudian dilaporkan sebagai $K_h = Ad/g$ dan $K_v = 0,6K_h$, sedangkan $K_o = \alpha K_h$ dengan $\alpha = 0,5$ dicantumkan pada dokumen asal sebagai koreksi pengaruh struktur. Nilai akhir yang digunakan dalam analisis adalah $K_h = 0,033$ dan $K_v = 0,020$ untuk OBE serta $K_h = 0,163$ dan $K_v = 0,098$ untuk MDE. Karena lembar hitung asli dan konfigurasi proyek SLOPE/W tidak tersedia, konvensi tanda K_v dan detail orientasi penerapannya tidak dapat diaudit ulang; artikel ini karena itu memperlakukan K_h dan K_v sebagai input pseudo-statik yang diadopsi dari perhitungan sumber, bukan sebagai koefisien yang direderivasi secara independen.

Analisis stabilitas dilakukan dengan SLOPE/W menggunakan pendekatan keseimbangan batas metode Bishop, parameter berat volume jenuh, kohesi, sudut geser dalam, geometri bendungan, dan beban pseudo-statik. Dokumen sumber menyatakan bahwa distribusi tekanan air pori hasil SEEP/W pada masing-masing elevasi digunakan sebagai kondisi hidraulik dalam SLOPE/W, sehingga alur analisis bersifat sequentially coupled: medan hidraulik dihitung lebih dahulu dan kemudian digunakan pada evaluasi faktor keamanan. Namun, karena berkas proyek asli tidak tersedia, pemetaan numerik tekanan air pori antar-modul dan pengaturan pencarian bidang gelincir tidak dapat diverifikasi ulang. Faktor keamanan dibandingkan dengan SNI 8064:2016 [24]: FK minimum 1,50 untuk aliran langgeng tanpa gempa, 1,20 untuk OBE, dan 1,00 untuk MDE sesuai kriteria yang digunakan dalam penelitian.

2.5 Analisis Rapid Drawdown

Rapid drawdown dianalisis pada lereng hulu dengan menurunkan muka air dari 104,18 mdpl menjadi 99,68 mdpl melalui tiga waktu yang tercatat: 6,0 jam (0,25 hari), 10,8 jam (0,45 hari), dan 18,0 jam (0,75 hari). Hanya satu keluaran faktor keamanan yang terdokumentasi, yaitu $FK = 2,417$ pada $t = 18$ jam. Tidak tersedia FK pada $t = 6,0$ dan 10,8 jam maupun informasi yang membuktikan bahwa nilai pada $t = 18$ jam merupakan minimum sepanjang transien. Dalam analisis stabilitas lereng salah satu kondisi kritis yang harus diperhatikan adalah kondisi rapid drawdown atau penurunan muka air cepat [25]. Oleh sebab itu, analisis rapid drawdown pada artikel ini dibatasi pada pemeriksaan kondisi akhir terhadap FK minimum 1,30 untuk kondisi surut cepat berdasarkan SNI 8064:2016 [24], tanpa pemerinkatan terhadap skenario MDE.

2.6 Batas Interpretasi Perbandingan Model–Monitoring

Karena q/Q_2D dan debit V-notch tidak terbukti merepresentasikan control volume yang sama, penelitian tidak menggunakan rasio RQ maupun selisih relatif DQ sebagai indikator performa model. Perbandingan dilakukan secara kualitatif-deskriptif: arah perubahan pada masing-masing sumber data dilaporkan, tetapi besarnya selisih tidak ditafsirkan sebagai error model. Demikian pula, margin terhadap FK minimum digunakan hanya untuk menunjukkan kedekatan hasil terhadap kriteria, bukan untuk menyatakan signifikansi perbedaan antar-skenario tanpa analisis sensitivitas atau ketidakpastian.

Batas inferensi utama penelitian meliputi hanya dua snapshot V-notch, metadata monitoring yang tidak lengkap, ketidakpastian kesetaraan domain model–monitoring, tidak tersedianya file proyek GeoStudio, serta tidak adanya analisis sensitivitas parameter. Batas-batas tersebut digunakan secara eksplisit ketika menafsirkan hasil.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Klasifikasi Risiko dan Koefisien Gempa

Hasil penilaian risiko Bendungan Raknamo menghasilkan FR_{total} sebesar 24 dan menempatkan bendungan pada kelas risiko III (tinggi). Kebutuhan evakuasi memberikan kontribusi terbesar terhadap skor total, yaitu 12, sedangkan kapasitas tampungan, tinggi bendungan, dan tingkat kerusakan masing-masing bernilai 4. Klasifikasi ini menjadi dasar penetapan OBE dengan periode ulang 100 tahun dan MDE dengan periode ulang 5.000 tahun [23].

Tabel 2. Klasifikasi risiko Bendungan Raknamo

Faktor Risiko	Ukuran	Kategori	Nilai
Kapasitas tampungan (FRk)	14,70 juta m ³	Tinggi	4
Tinggi bendungan (FRt)	37 m	Tinggi	4
Kebutuhan evakuasi (FRe)	>1.000 orang	Ekstrem	12
Tingkat kerusakan (FRh)	Sedang	Sedang	4
Jumlah (FRtotal)			24
Klasifikasi		Tinggi (III)	

Sumber: hasil analisis berdasarkan pedoman [23] dan data Bendungan Raknamo [17].

Sebagaimana dirangkum pada Tabel 2, nilai FRtotal sebesar 24 terutama dipengaruhi oleh faktor kebutuhan evakuasi yang memiliki skor tertinggi. Nilai tersebut menempatkan Bendungan Raknamo pada kelas risiko III dan menjadi dasar penentuan periode ulang OBE dan MDE. Peta bahaya gempa 2017 memberikan nilai zona yang digunakan sebesar 0,175 g untuk OBE dan 0,550 g untuk MDE. Perhitungan menghasilkan koefisien horizontal Kh sebesar 0,033 untuk OBE dan 0,163 untuk MDE. Nilai Kh pada MDE hampir lima kali nilai OBE, sehingga skenario MDE memberikan tambahan gaya inersia yang jauh lebih besar pada analisis pseudo-statik. Tabel 3 merangkum parameter pseudo-statik yang digunakan dalam analisis stabilitas. Nilai Kh meningkat dari 0,033 pada kondisi OBE menjadi 0,163 pada kondisi MDE, sedangkan nilai Kv meningkat dari 0,020 menjadi 0,098. Peningkatan kedua koefisien tersebut menunjukkan bahwa kondisi MDE memberikan beban pseudo-statik yang lebih besar dibandingkan kondisi OBE.

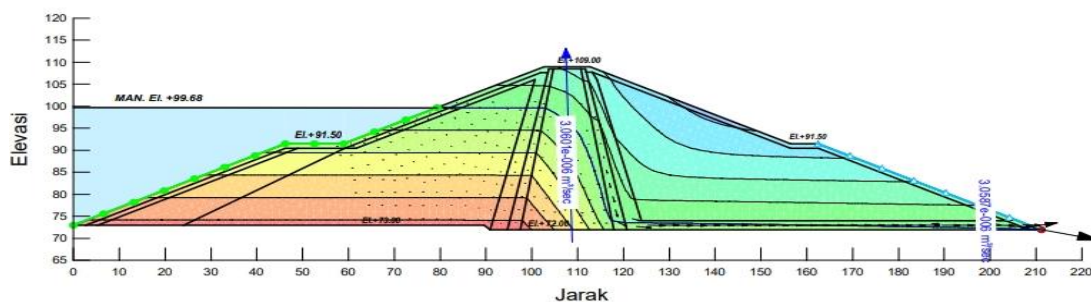
Tabel 3. Koefisien gempa yang digunakan dalam analisis

Kondisi	Periode Ulang (tahun)	Z	Ac	V	Ad	Kh	Kv	Ko
OBE	100	0,175	0,227	0,8	0,032	0,033	0,020	0,017
MDE	5.000	0,550	0,364	0,8	0,160	0,163	0,098	0,082

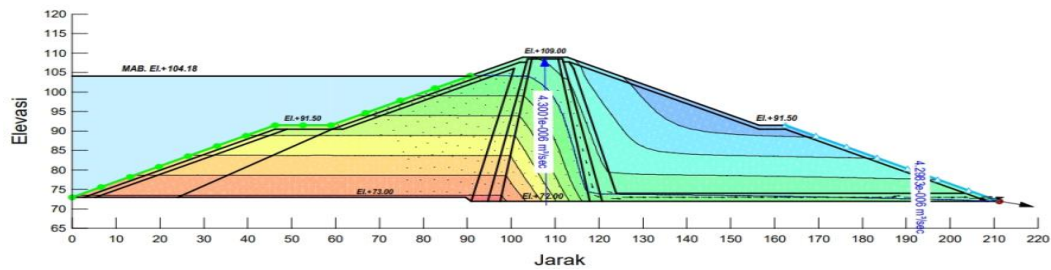
Sumber: Hasil analisis berdasarkan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia 2017 [22].

3.2 Debit Rembesan dan Perbandingan dengan V-Notch

Pemodelan SEEP/W menunjukkan peningkatan debit ketika elevasi muka air meningkat. Pada elevasi 99,68 mdpl, debit per satuan lebar sebesar $3,0587 \times 10^{-6}$ m³/dtk/m dan menghasilkan debit representatif 0,001376 m³/dtk. Pada elevasi 104,18 mdpl, debit per satuan lebar meningkat menjadi $4,2983 \times 10^{-6}$ m³/dtk/m dengan debit representatif 0,001933 m³/dtk. Kenaikan ini setara sekitar 40,5%, yang menunjukkan respons model terhadap bertambahnya beda tinggi hidrolik. Kecenderungan peningkatan debit akibat tinggi hidrostatik juga dilaporkan pada studi simulasi bendungan urugan [20].


Gambar 3. Distribusi rembesan SEEP/W pada elevasi 99,68 mdpl; nilai numerik utama dirangkum pada Tabel 4

Sumber: hasil pemodelan penelitian



Gambar 4. Distribusi rembesan SEEP/W pada elevasi 104,18 mdpl; nilai numerik utama dirangkum pada Tabel 4

Sumber: hasil pemodelan penelitian

Gambar 3 dan Gambar 4 memperlihatkan respons distribusi rembesan pada dua kondisi muka air waduk. Peningkatan elevasi dari 99,68 mdpl menjadi 104,18 mdpl diikuti peningkatan debit per satuan lebar dari $3,0587 \times 10^{-6}$ menjadi $4,2983 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{dtk}/\text{m}$. Pola tersebut menunjukkan bahwa kenaikan muka air meningkatkan respons hidraulik pada model SEEP/W, meskipun besarnya perubahan tidak digunakan untuk mengkalibrasi hasil monitoring V-notch.

Tabel 4. Perbandingan debit SEEP/W dan monitoring V-notch

Elevasi	SEEP/W (m^3/dtk)	V-notch (m^3/dtk)	Catatan komparabilitas	Batas (m^3/dtk)	Status
99,68 mdpl	0,001376	0,00360	Control volume tidak terbukti setara	0,02057	Memenuhi
104,18 mdpl	0,001933	0,00992	Control volume tidak terbukti setara	0,02057	Memenuhi

Sumber: keluaran model dan arsip monitoring; ambang $0,02057 \text{ m}^3/\text{dtk}$ merupakan acuan operasional spesifik Bendungan Raknamo dalam dokumen sertifikasi [17].

Berdasarkan Tabel 4, debit V-notch pada kedua elevasi lebih besar daripada nilai Q_2D hasil penskalaan model SEEP/W. Namun, perbedaan tersebut tidak dapat langsung ditafsirkan sebagai galat model karena kedua sumber data belum terbukti merepresentasikan volume kontrol yang sama. V-notch mencatat $0,00360 \text{ m}^3/\text{dtk}$ pada keadaan 99,68 mdpl dan $0,00992 \text{ m}^3/\text{dtk}$ pada keadaan 104,18 mdpl. Kedua nilai lebih besar daripada nilai Q_2D yang dihitung dari penskalaan penampang. Namun, karena Q_2D dibentuk dengan asumsi keseragaman sepanjang bendungan dan daerah tangkapan V-notch tidak terdelineasi, selisih numerik antara kedua besaran tidak ditafsirkan sebagai error atau bias SEEP/W. Informasi yang dapat dinyatakan secara defensibel adalah bahwa pada dua snapshot tersebut baik keluaran model maupun monitoring menunjukkan debit yang lebih tinggi pada keadaan muka air 104,18 mdpl dibandingkan 99,68 mdpl; dua titik tetap tidak cukup untuk membentuk hubungan statistik muka air–debit.

Perbedaan magnitudo dapat berkaitan dengan ketidaksetaraan domain maupun penyederhanaan model. Model 2D mewakili satu penampang, sedangkan V-notch dapat merekam kontribusi dari sistem drainase, pondasi, abutmen, dan heterogenitas longitudinal. Integrasi data monitoring dan heterogenitas internal penting dalam evaluasi model rembesan bendungan [26]. Dengan tidak tersedianya metadata dan arsip model yang memadai, penelitian Raknamo tidak mengisolasi penyebab perbedaan dan tidak mengklaim kalibrasi atau validasi model.

Dokumen sertifikasi Bendungan Raknamo mencantumkan batas evaluasi debit sebesar $0,02057 \text{ m}^3/\text{dtk}$ [17]. Dalam artikel ini, angka tersebut diperlakukan sebagai ambang operasional spesifik lokasi yang berasal dari dokumen sertifikasi, bukan sebagai batas regulasi umum untuk seluruh bendungan urugan. Dua pembacaan V-notch yang tersedia, $0,00360$ dan $0,00992 \text{ m}^3/\text{dtk}$, berada di bawah ambang tersebut. Status “memenuhi” pada Tabel 4 dengan demikian hanya berarti memenuhi acuan operasional yang digunakan pada dokumen Bendungan Raknamo, dan tidak digunakan sebagai bukti bahwa model SEEP/W telah tervalidasi.

3.3 Stabilitas Lereng pada Kondisi Statik, OBE, dan MDE

Hasil analisis stabilitas pada dua elevasi muka air serta tiga kondisi pembebanan dirangkum pada Tabel 5. Faktor keamanan dihitung untuk lereng hulu dan hilir pada kondisi tanpa gempa, OBE, dan MDE, kemudian dibandingkan dengan kriteria minimum yang digunakan dalam penelitian.

Tabel 5. Rekapitulasi faktor keamanan lereng Bendungan Raknamo

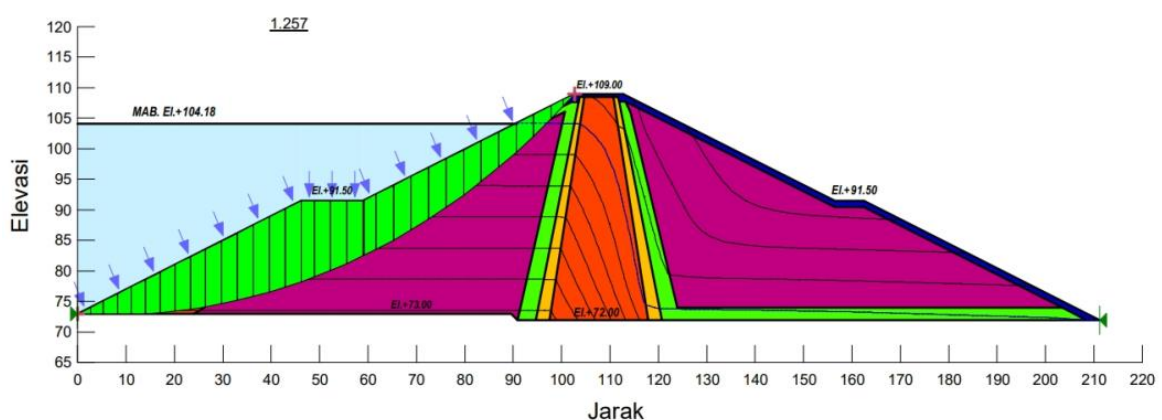
Elevasi	Lereng	Tanpa Gempa	OBE	MDE
99,68 mdpl	Hulu	2,384	1,999	1,259
99,68 mdpl	Hilir	2,088	1,893	1,400
104,18 mdpl	Hulu	2,504	2,068	1,257
104,18 mdpl	Hilir	2,082	1,888	1,396
FK minimum		1,50	1,20	1,00

Sumber: hasil analisis; kriteria minimum mengacu pada SNI 8064:2016 [24]

Medan tekanan air pori hasil SEEP/W pada setiap elevasi digunakan dalam SLOPE/W sebelum faktor keamanan dihitung. Pada kondisi tanpa gempa, FK berada pada 2,082–2,504 dan seluruhnya melampaui FK minimum 1,50. Pada lereng hulu, FK meningkat dari 2,384 pada 99,68 mdpl menjadi 2,504 pada 104,18 mdpl, sedangkan lereng hilir berubah kecil dari 2,088 menjadi 2,082. Perbedaan respons hulu–hilir menunjukkan bahwa efek muka air tidak dapat direduksi menjadi satu arah perubahan karena tekanan hidrostatik eksternal dan tekanan air pori internal bekerja secara berbeda pada masing-masing sisi.

Pembebanan OBE menurunkan FK dibanding kondisi statik, tetapi seluruh nilai masih lebih besar dari FK minimum 1,20. Nilai terendah OBE adalah 1,888 pada lereng hilir elevasi 104,18 mdpl. Penurunan tersebut konsisten dengan bertambahnya gaya inersia pseudo-statik yang meningkatkan komponen penggerak pada massa potensial longsor [27],[19].

Kondisi MDE menghasilkan FK 1,257–1,400 dan merupakan kelompok pembebanan dengan nilai FK paling rendah. Pada lereng hulu, FK MDE adalah 1,259 pada elevasi 99,68 mdpl dan 1,257 pada 104,18 mdpl. Selisih 0,002 sangat kecil dibandingkan tingkat presisi input dan ketidakpastian yang tidak dikuantifikasi dalam penelitian. Tanpa analisis sensitivitas terhadap c , ϕ , k , tekanan air pori, koefisien gempa, mesh, dan pencarian bidang gelincir, kedua hasil tersebut tidak diperlakukan sebagai peringkat yang signifikan; keduanya dipandang sebagai kondisi MDE hulu yang sama-sama dekat terhadap batas dibanding skenario lain yang dianalisis.



Gambar 5. Hasil bidang gelincir pada kondisi MDE, lereng hulu elevasi 104,18 mdpl (FK = 1,257)

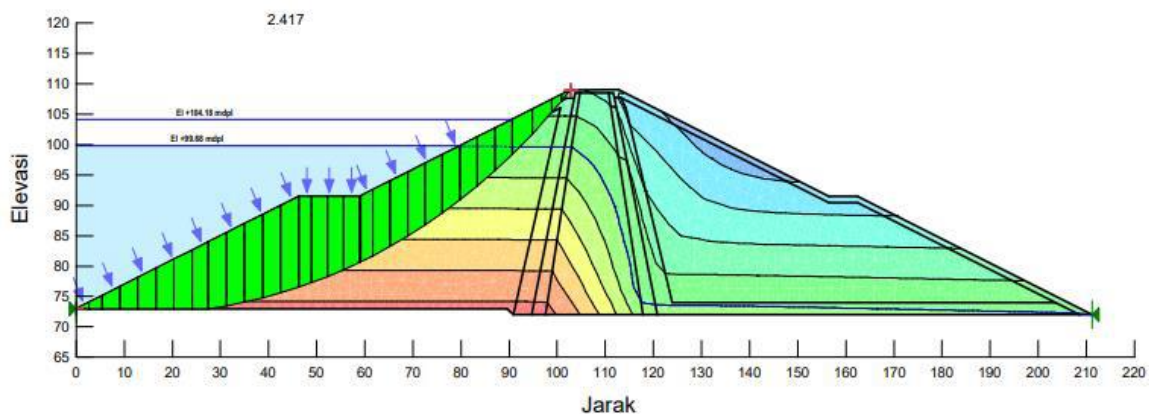
Sumber: hasil pemodelan penelitian

Gambar 5 memperlihatkan hasil pencarian bidang gelincir pada lereng hulu untuk kondisi MDE pada elevasi 104,18 mdpl. Analisis menghasilkan FK sebesar 1,257, yang masih berada di atas kriteria minimum 1,00. Nilai tersebut termasuk kelompok FK terendah dalam skenario yang dianalisis, tetapi tidak diperlakukan sebagai kondisi kritis tunggal karena perbedaannya terhadap FK 1,259 pada elevasi 99,68 mdpl sangat kecil. . Seluruh hasil MDE masih berada di atas FK minimum 1,00 yang digunakan dalam penelitian. Namun, artikel ini tidak menetapkan

satu elevasi MDE sebagai “skenario pengendali” secara unik karena selisih FK hulu 1,259 dan 1,257 tidak dapat dibedakan secara bermakna tanpa analisis sensitivitas atau ketidakpastian. Temuan yang lebih kuat adalah bahwa kelompok MDE pada lereng hulu memberikan faktor keamanan terendah di antara skenario statik dan seismik yang tersedia.

3.4 Stabilitas pada Kondisi Rapid Drawdown

Rapid drawdown dari elevasi 104,18 mdpl ke 99,68 mdpl disimulasikan hingga $t = 18$ jam. Faktor keamanan yang terdokumentasi untuk kondisi akhir adalah 2,417, lebih besar daripada FK minimum 1,30 [24]. Karena FK antara pada $t = 6,0$ jam dan 10,8 jam tidak tersedia, hasil ini tidak digunakan untuk menyatakan bahwa 2,417 merupakan nilai minimum selama seluruh proses drawdown.



Gambar 6. Stabilitas lereng pada kondisi akhir rapid drawdown, $t = 18$ jam (FK = 2,417)

Sumber: hasil pemodelan penelitian

Gambar 6 menunjukkan kondisi lereng hulu pada akhir simulasi rapid drawdown setelah muka air turun dari 104,18 mdpl menjadi 99,68 mdpl selama 18 jam. Pada kondisi akhir tersebut diperoleh FK sebesar 2,417, yang berada di atas kriteria minimum 1,30. Gambar ini hanya merepresentasikan kondisi akhir simulasi dan tidak menunjukkan bahwa FK 2,417 merupakan nilai minimum selama seluruh proses transien. Ringkasan kondisi rapid drawdown yang dapat ditelusuri dari arsip penelitian disajikan pada tabel 6.

Tabel 6. Rekapitulasi analisis rapid drawdown

Perubahan Elevasi	Tahap yang dilaporkan	Waktu (jam)	Kondisi FK	FK	FK minimum	Status
104,18 → 99,68 mdpl	Akhir	18,0	$t = 18$ jam	2,417	1,30	Memenuhi

Sumber: hasil analisis; kriteria minimum mengacu pada SNI 8064:2016 [24].

Tabel 6 menunjukkan bahwa kondisi akhir pada $t = 18$ jam memenuhi kriteria faktor keamanan yang digunakan. Namun, karena nilai FK pada tahap antara tidak tersedia, tabel tersebut tidak digunakan untuk menentukan FK minimum sepanjang riwayat drawdown. Pada kondisi akhir $t = 18$ jam, FK = 2,417 masih berada di atas FK minimum 1,30. Hasil ini hanya mendukung pernyataan bahwa keadaan akhir drawdown yang terdokumentasi memenuhi kriteria. Karena FK pada $t = 6,0$ jam dan 10,8 jam tidak tersedia, tidak dapat ditentukan apakah nilai minimum terjadi sebelum $t = 18$ jam dan kondisi rapid drawdown tidak diperingkat terhadap skenario MDE. Literatur menunjukkan bahwa respons drawdown sensitif terhadap permeabilitas, rasio penurunan, dan laju perubahan muka air [26],[21].

3.5 Sintesis Bukti Monitoring dan Respons Stabilitas

Hasil rembesan dan stabilitas memberikan dua jenis bukti yang tidak disatukan menjadi satu indeks. Untuk rembesan, q dari SEEP/W merupakan keluaran penampang 2D, sedangkan debit V-notch merupakan pengukuran sistem monitoring dengan daerah tangkapan yang tidak terdelineasi. Keduanya dapat dibaca berdampingan untuk melihat konsistensi arah respons pada dua keadaan muka air, tetapi tidak digunakan untuk menghitung error model.

Untuk stabilitas, hasil dibandingkan dengan kriteria minimum yang relevan, sementara perbedaan sangat kecil antar-skenario tidak dianggap signifikan tanpa analisis ketidakpastian.

Pada kondisi statik dan OBE, seluruh FK berada di atas kriteria minimum. Pada MDE, dua nilai terendah terdapat pada lereng hulu: 1,259 pada 99,68 mdpl dan 1,257 pada 104,18 mdpl. Kedua nilai diperlakukan sebagai hasil yang praktis setara pada resolusi data yang tersedia. Rapid drawdown hanya dapat dinilai pada kondisi akhir $t = 18$ jam ($FK = 2,417$) dan tidak dapat dibandingkan sebagai minimum time-history dengan MDE. Batas komparabilitas dan tingkat interpretasi yang dapat didukung oleh setiap kelompok bukti dirangkum pada tabel 7.

Tabel 7. Sintesis bukti, batas komparabilitas, dan interpretasi yang didukung

Domain	Bukti yang tersedia	Keterbatasan utama	Interpretasi yang didukung	Tidak diklaim
Rembesan model	q dan Q_2D pada 2 elevasi	Penskalaan 2D→panjang; file model tidak tersedia	Respons numerik penampang pada dua keadaan	Error/validasi terhadap V-notch
Monitoring V-notch	0,00360 dan 0,00992 m^3/dtk	Hanya 2 snapshot; head mentah & metadata tidak tersedia	Status terhadap ambang operasional lokasi	Tren statistik muka air-debit
MDE hulu	FK 1,259 dan 1,257	Tanpa analisis sensitivitas/ketidakpastian	Keduanya merupakan nilai FK terendah	Peringkat signifikan berdasarkan selisih 0,002
Rapid drawdown	FK 2,417 pada $t=18$ jam	FK intermediate tidak tersedia	Kondisi akhir memenuhi FK minimum 1,30	FK minimum time-history / peringkat vs MDE
Integrasi	SEEP/W, V-notch, SLOPE/W	Bukti berasal dari domain dan metadata berbeda	Screening teknik multi-bukti	Framework validasi universal

Sumber: sintesis hasil penelitian; interpretasi dibatasi oleh ketersediaan data dan arsip model.

Sintesis ini memisahkan status operasional dari validasi model. Ambang debit 0,02057 m^3/dtk berasal dari dokumen sertifikasi Bendungan Raknamo [17] dan digunakan hanya untuk menilai dua pembacaan V-notch terhadap acuan lokasi. Sementara itu, hasil SEEP/W digunakan untuk menggambarkan perilaku numerik penampang dan memasok kondisi tekanan air pori pada analisis stabilitas sesuai dokumen sumber. Ketidaksetaraan control volume, metadata monitoring yang terbatas, dan ketiadaan file proyek asli mencegah klaim validasi satu-ke-satu.

Kontribusi penelitian ini karena itu lebih tepat diposisikan sebagai studi kasus evaluasi terpadu dengan batas inferensi yang eksplisit: monitoring lapangan dipertahankan sebagai bukti operasional independen, sedangkan pemodelan digunakan untuk mengevaluasi respons hidraulik penampang dan rentang faktor keamanan. Pengembangan berikutnya memerlukan deret waktu muka air-V-notch, head mentah, curah hujan, piezometer, delineasi sistem drainase, serta file model asli agar kalibrasi dan analisis sensitivitas dapat dilakukan secara formal [26].

3.6 Keterbatasan Inferensi dan Reprodusibilitas

Kekuatan kesimpulan dibatasi pada informasi yang dapat ditelusuri dari arsip penelitian. Model SEEP/W tidak dapat direplikasi pada tingkat mesh, kondisi batas, fungsi hidraulik, dan solver; pembacaan V-notch tidak memiliki head mentah maupun metadata ketidakpastian; control volume model dan monitoring belum dibuktikan setara; nilai FK rapid drawdown hanya tersedia pada $t = 18$ jam; dan tidak dilakukan analisis sensitivitas untuk menilai signifikansi selisih FK 0,002 pada dua kondisi MDE hulu. Oleh karena itu, hasil digunakan sebagai screening teknik dan dokumentasi respons pada skenario yang tersedia, bukan sebagai validasi numerik formal atau bukti peringkat kritis yang presisi.

4. KESIMPULAN

Pada dua keadaan muka air yang tersedia, SEEP/W menghasilkan debit per satuan lebar $3,0587 \times 10^{-6}$ dan $4,2983 \times 10^{-6}$ m³/dtk/m. Nilai ekuivalen hasil penskalaan panjang bendungan adalah 0,001376 dan 0,001933 m³/dtk, sedangkan V-notch mencatat 0,00360 dan 0,00992 m³/dtk. Karena keseragaman longitudinal dan kesetaraan daerah tangkapan tidak dapat dibuktikan, perbedaan magnitudo tersebut tidak digunakan sebagai error, rasio validasi, atau bukti bahwa representasi model memburuk pada muka air yang lebih tinggi. Kedua pembacaan V-notch berada di bawah ambang operasional 0,02057 m³/dtk yang tercantum pada dokumen sertifikasi lokasi.

Analisis SLOPE/W menghasilkan FK 2,082–2,504 pada kondisi statik, 1,888–2,068 pada OBE, dan 1,257–1,400 pada MDE. Dua nilai MDE hulu, 1,259 pada 99,68 mdpl dan 1,257 pada 104,18 mdpl, merupakan nilai terendah tetapi tidak dibedakan sebagai peringkat kritis yang pasti karena selisih 0,002 belum diuji melalui analisis sensitivitas atau ketidakpastian. Rapid drawdown dari 104,18 ke 99,68 mdpl menghasilkan FK 2,417 pada $t = 18$ jam; nilai minimum selama riwayat transien tidak dapat ditentukan dari arsip yang tersedia.

Kontribusi studi ini adalah penyajian evaluasi yang memisahkan secara tegas fungsi monitoring dan pemodelan: V-notch digunakan sebagai bukti operasional aktual, sedangkan SEEP/W–SLOPE/W digunakan untuk mengevaluasi respons penampang dan faktor keamanan pada skenario yang tersedia. Keterbatasan metadata monitoring, ketidakjelasan kesetaraan control volume, ketiadaan file proyek asli, dan tidak adanya analisis sensitivitas membatasi generalisasi hasil. Deret waktu monitoring, data piezometer, curah hujan, delineasi sistem drainase, serta arsip model lengkap diperlukan untuk kalibrasi dan verifikasi yang lebih kuat.

REFERENSI

- [1] S. Aji, P. Arya, and M. Iryanti, “Aplikasi Metode Ground Penetrating Radar Terhadap Pola Retakan Di Bendungan Batu Tegi Lampung,” 2016. [Online]. Available: <http://ejournal.upi.edu/index.php/wafi>
- [2] D. P. Sereh, D. S. Krisnayanti, and E. E. Hangge, “Analisis Stabilitas Lereng Pada Tubuh Bendungan Manikin,” *Forum Teknik Sipil*, vol. 05, no. 02, pp. 11–21, 2025.
- [3] N. Chayati, M. H. Wicaksono, and F. M. L. Taqwa, “Analisis Stabilitas Lereng Bendungan Terhadap Beban Gempa sebagai Upaya Pengurangan Bencana (Studi Kasus: Bendungan Jlantah),” *Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi*, vol. 23, no. 1, p. 1035, 2023, doi: 10.33087/jiubj.v23i1.2249.
- [4] M. Saidillah and H. K. Artati, “Analisis Rembesan Dan Stabilitas Bendungan Saradan,” *Jurnal Teknik Sipil Cendekia*, vol. 3, no. 2, pp. 1–15, 2022, doi: 10.51988/jtsc.v3i2.43.
- [5] B. S. Nasional, “SNI 8065:2016 Metode analisis dan cara pengendalian rembesan air untuk bendungan tipe urugan,” in *Badan Standardisasi Nasional*, 2016.
- [6] R. A. M. Putra, A. D. Putra, and E. P. Wahono, “Analisis Rembesan Terhadap Bahaya Piping Pada Bendungan Way Sekampung,” *Aplikasi Teknik Sipil*, vol. 20, no. November, pp. 439–448, 2022.
- [7] R. M. S. Panggabean and W. K. Sadono, “Analisis Tekanan Air Pori Dan Rembesan Pada Proyek Pembangunan Bendungan Tigadihaji Sumatera Selatan,” *Rab Contruction Research*, vol. 10, no. 1, pp. 201–213, 2025.
- [8] Siswanto, Suprpto, and S. S. Sachro, “Hubungan Antara Elevasi Muka Air Waduk Dan Panjang Lintasan Rembesan Terhadap Debit Rembesan Pada Bendungan Urugan Batu Inti Tegak (Studi Kasus Bendungan Jatibarang),” *Jurnal Teknik Hidraulik*, vol. 10, no. 2, 2019, doi: 10.32679/jth.v10i2.628.
- [9] R. Buldan, Suharyanto, Najib, and K. W. Sadono, “Analisis Rembesan Terhadap Keamanan Bendungan Kedung Ombo Di Grobogan, Jawa Tengah,” *Jurnal Teknik Hidraulik*, vol. 12, no. 2, pp. 79–92, 2021, doi: 10.32679/jth.v12i2.657.
- [10] A. D. Nashihah, W. K. Hidajat, and N. Santi, “Analisis Rembesan Pada Perencanaan Pembangunan Terhadap Keamanan Bendungan Pidekso, Kabupaten Wonogiri, Jawa Tengah,” *Geosains dan Teknologi*, vol. 5, no. 1, pp. 1–15, 2022, doi: 10.14710/jgt.5.1.2022.1-15.
- [11] Y. Astuti, A. Masrevaniah, and S. Marsudi, “Analisa rembesan bendungan bajulmati terhadap bahaya piping untuk perencanaan perbaikan pondasi,” *Teknik Pengairan*, vol. 3, pp. 51–60, 2012.
- [12] I. G. N. P. Dharmayasa, “Analisis Rembesan Di Bawah Tubuh Bendungan Urugan,” *Jurnal Paduraksa*, vol. 7, pp. 53–62, 2018.
- [13] A. D. Juandani, A. Syah, M. S. S. Kuba, and ..., “Penerapan Model Geostudio untuk Analisis Stabilitas Bendungan Karalloe,” *Jurnal Jumpstech*, vol. 2, no. 1, pp. 32–42, 2023.



- [14] E. Aisah and D. Ardiansyah, "Pengaruh Geometri Lereng Terhadap Stabilitas Lereng menggunakan Aplikasi SLOPE/W 2012," *Jurnal Tekno Global*, vol. 12, no. 01, pp. 1–7, 2023, doi: 10.36982/jtg.v12i01.3082.
- [15] C. R. Totu, A. J. Tallo, and Y. Fallo, "Penilaian Kinerja Jaringan Irigasi Air Tanah Sumur PNK-219 Berdasarkan Indeks Penilaian Operasi dan Pemeliharaan pada Daerah Irigasi Desa Nunkurus," *Ilmiah Teknologi Harapan*, vol. 14, no. 1, pp. 1–14, 2026.
- [16] B. B. W. S. N. T. II, "Laporan Akhir Sertifikasi Bendungan Raknamo. Kupang," 2020.
- [17] S. Sosrodarsono and K. Takeda, "Bendungan Tipe Urugan," in *Pradnya Paramita*, Jakarta, 1977, p. 327.
- [18] T. N. F. Nanda and I. N. Hamdhan, "Analisis rembesan dan stabilitas Bendungan Bajulmati dengan metode elemen hingga model 2D dan 3D," *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, vol. 2 No.4 Des, no. 4, pp. 1–12, 2016.
- [19] Nurnawaty, Suhardiman, and Ihwan, "Analisis Rembesan Pada Bendungan Tipe Urugan (Uji Simulasi Lab)," *Jurnal Teknik Hidro*, vol. 11, no. 1, pp. 12–22, 2018.
- [20] M. M. Berilgen, "Investigation of stability of slopes under drawdown conditions," *Comput. Geotech.*, vol. 34, pp. 81–91, 2007, doi: 10.1016/j.compgeo.2006.10.004.
- [21] P. S. G. Nasional, "Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017," in *Pusat Studi Gempa Nasional*, 2017.
- [22] Departemen Pekerjaan Umum, *Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa*. Jakarta, 2004.
- [23] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 8064:2016 Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Tipe Urugan," in *Badan Standardisasi Nasional*, Jakarta, 2016, p. 6.
- [24] A. N. Al Islami, E. A. Suryo, and A. Rachmansyah, "Analisis stabilitas bendungan selorejo akibat rapid drawdown berdasarkan hasil survey electrical resistivity tomography (ert) 1," *Mahasiswa Teknik Sioil*, 2015.
- [25] R. Norooz, T. Dahlin, and J. Toromanovic, "Integration of seepage modelling and electrical resistivity monitoring data for the Alvkarleby test embankment dam , Sweden," *Eng. Geol.*, vol. 357, no. August, p. 108311, 2025, doi: 10.1016/j.enggeo.2025.108311.