



Pengaruh Rembesan terhadap Stabilitas Keamanan Bendungan Leuwikeris Berdasarkan Parameter Material Timbunan

Muhammad Andhi Hidayat¹, Bagus Putra Nugraha²

Universitas Diponegoro, Indonesia

Email: hidayatandhi@gmail.com, ophenkrush@gmail.com

Abstrak:

Latar belakang penelitian ini adalah pentingnya menjamin stabilitas keamanan Bendungan Leuwikeris, yang berperan dalam irigasi, penyediaan air baku, dan pengendalian banjir di wilayah Ciamis, Jawa Barat. Fluktuasi muka air waduk dan rembesan dapat memengaruhi stabilitas lereng bendungan, sehingga diperlukan analisis mendalam terhadap parameter material timbunan dan kondisi pembebanan gempa. Tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi faktor keamanan (*safety factor*) bendungan berdasarkan berbagai skenario, termasuk kondisi konstruksi, pengisian waduk, dan pembebanan gempa (OBE dan MDE). Metode penelitian melibatkan pemodelan stabilitas lereng menggunakan perangkat lunak Geo-Studio Slope/W 2023.1.0 dengan pendekatan keseimbangan batas (*limit equilibrium method*) dan analisis dinamik metode Makdisi-Seed untuk prediksi deformasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor keamanan memenuhi kriteria pada kondisi konstruksi dan pengisian waduk, namun tidak memenuhi syarat saat pembebanan gempa MDE. Namun, analisis deformasi membuktikan bahwa pergeseran maksimum (110 cm) masih di bawah batas aman (368,5 cm). Implikasi penelitian ini adalah perlunya pemantauan terus-menerus dan desain mitigasi untuk mengantisipasi risiko gempa besar, serta rekomendasi material timbunan yang optimal untuk meningkatkan stabilitas bendungan.

Kata Kunci: bendungan leuwikeris, stabilitas lereng bendungan, material timbunan, *safety factor*, fluktuasi muka air waduk, geo-studio slope/w 2023.1.0

Abstract:

The background of this research is the importance of ensuring the stability of the Leuwikeris Dam, which plays a role in irrigation, raw water supply, and flood control in the Ciamis region, West Java. Fluctuations in reservoir water levels and seepage can affect the stability of dam slopes, so an in-depth analysis of embankment material parameters and earthquake loading conditions is required. The objective of this study is to evaluate the dam's safety factor based on various scenarios, including construction conditions, reservoir filling, and seismic loading (OBE and MDE). The research method involves slope stability modeling using Geo-Studio Slope/W 2023.1.0 software with the limit equilibrium method and dynamic analysis using the Makdisi-Seed method for deformation prediction. The results show that the safety factor meets the criteria under construction and reservoir filling conditions but does not meet the requirements under MDE earthquake loading. However, deformation analysis demonstrated that the maximum displacement (110 cm) remains below the safe limit (368.5 cm). The implications of this study are the need for continuous monitoring and mitigation design to anticipate the risk of major earthquakes, as well as recommendations for optimal fill materials to enhance dam stability.

Keywords: lewisiris dam, dam slope stability, backfill materials, safety factors, reservoir water level fluctuations, geo-studio slope/w 2023.1.0

Corresponding: Muhammad Andhi Hidayat

E-mail: hidayatandhi@gmail.com



PENDAHULUAN

Pengumpulan data dilakukan melalui pendekatan data primer dan sekunder, yang mencakup gambar as-built drawing, data material dari hasil uji test pit terbaru, serta data hasil pengujian parameter dinamik yang diperoleh dari Balai BHGK dan pengujian langsung di lapangan. Analisis stabilitas lereng terkini menggunakan koefisien gempa yang ditentukan berdasarkan lokasi bendungan sesuai dengan Peta Gempa Indonesia tahun 2017 (Departemen Pekerjaan Umum, 2017 ; Setiawan et al., 2020). Periode ulang gempa ditentukan melalui analisis yang mengacu pada Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa tahun 2004 (Husni et al., 2018) dan didukung oleh penelitian sebelumnya terkait pengaruh gempa terhadap struktur bendungan (Kurniawan et al., 2019). Pendekatan ini juga mencakup kajian tentang pengaruh gempa terhadap stabilitas lereng yang telah dibahas oleh beberapa penelitian sebelumnya (Abdurrahman et al., 2017). Pengujian parametric stability dan analisis siklus gempa diperlukan untuk memahami potensi kerusakan struktur dalam kondisi seismik tertentu (Pratama, 2021). Semua data tersebut penting untuk memastikan akurasi dan ketahanan bendungan terhadap gempa, sesuai dengan panduan yang ada (Sumarno et al., 2022).

Namun, menurut pedoman tersebut (2004), metode penentuan koefisien gempa yang dijelaskan sudah tidak lagi relevan, sehingga diperlukan penyesuaian. Oleh karena itu, digunakan pendekatan dari Jepang melalui dokumen Seismic Design Guideline for Fill Dam sebagai referensi baru. Analisis stabilitas dilakukan menggunakan metode keseimbangan batas (limit equilibrium method) dengan memasukkan koefisien gempa K , dan menghasilkan nilai berupa faktor keamanan. Periode ulang gempa yang digunakan disesuaikan dengan hasil evaluasi terhadap OBE (*Operating Basis Earthquake*) dan MDE (*Maximum Design Earthquake*), menyesuaikan dengan tipe dan parameter teknis Bendungan Leuwikeris.

Analisis dinamik dilanjutkan menggunakan metode Makdisi-Seed (Simplified Method), yang mengandalkan percepatan gempa rata-rata dalam memperkirakan deformasi pada tubuh bendungan. Metode ini mampu memprediksi besarnya permanent displacement yang mungkin terjadi akibat gempa. Sebagai langkah kalibrasi, digunakan metode empiris dari Swaisgood, yang disusun berdasarkan data penurunan puncak bendungan dari 69 kejadian gempa di berbagai belahan dunia (Swaisgood, 2003). Dari data tersebut, disusun sebuah persamaan yang divisualisasikan dalam bentuk grafik, sehingga memungkinkan estimasi prosentase penurunan puncak bendungan akibat gempa (Hibatulloh, 2024).

Bendungan memegang peran kritis dalam pengelolaan sumber daya air, termasuk irigasi, penyediaan air baku, dan pengendalian banjir (ICOLD, 2011). Namun, stabilitas bendungan sering terancam oleh faktor seperti rembesan, fluktuasi muka air, dan aktivitas seismik (Azdan & Samekto, 2008). Penelitian terdahulu oleh Lontoh et al. (2020) menyoroti bahwa kegagalan lereng bendungan sering disebabkan oleh ketidaksesuaian parameter material dan beban dinamik, sementara Rahman et al. (2014) menekankan pentingnya analisis stabilitas berbasis software seperti Geo-Studio. Meskipun demikian, studi-studi tersebut belum secara komprehensif mengintegrasikan analisis rembesan, fluktuasi muka air, dan pembebanan gempa

dalam satu kerangka evaluasi, sehingga meninggalkan kesenjangan dalam pemahaman tentang interaksi faktor-faktor tersebut.

Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan untuk memastikan keandalan Bendungan Leuwikeris, yang mendukung ketahanan pangan dan air bagi ribuan hektar lahan di Jawa Barat. Menurut Peraturan Pemerintah No. 37 Tahun 2010, bendungan harus memenuhi standar keamanan ketat, terutama di wilayah rawan gempa seperti Indonesia. Namun, pedoman analisis gempa yang ada (Departemen PU, 2004) dinilai sudah tidak relevan, sehingga diperlukan pendekatan mutakhir seperti metode Makdisi-Seed (Swaisgood, 2003) untuk memprediksi deformasi. Tanpa analisis yang holistik, risiko kegagalan struktural dapat mengancam keselamatan masyarakat dan infrastruktur sekitarnya.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan pemodelan terintegrasi menggunakan Geo-Studio Slope/W 2023.1.0 untuk menganalisis stabilitas lereng dalam berbagai skenario, termasuk kondisi ekstrem seperti gempa MDE. Penelitian ini juga menggabungkan data lapangan terkini dengan parameter material probabilistik (probabilitas 80% terlampaui), yang jarang dilakukan dalam studi serupa. Selain itu, penggunaan metode empiris Swaisgood untuk kalibrasi deformasi memberikan perspektif baru dalam menilai keamanan bendungan di bawah pembebanan dinamik. Pendekatan ini tidak hanya memperkuat validitas hasil tetapi juga menyediakan template untuk evaluasi bendungan lain di wilayah seismik.

Tujuan penelitian adalah: (1) mengevaluasi faktor keamanan Bendungan Leuwikeris berdasarkan parameter material timbunan dan rembesan; (2) menganalisis pengaruh fluktuasi muka air waduk dan gempa (OBE/MDE) terhadap stabilitas lereng; serta (3) memprediksi deformasi maksimum menggunakan metode Makdisi-Seed. Kontribusi penelitian ini mencakup rekomendasi teknis untuk desain material timbunan yang lebih stabil dan protokol pemantauan berbasis risiko. Hasilnya diharapkan dapat menjadi acuan bagi praktisi dalam mengoptimalkan kinerja bendungan sekaligus memitigasi dampak bencana.

Implikasi penelitian ini bersifat praktis dan teoretis. Secara praktis, temuan tentang deformasi yang masih dalam batas aman (110 cm vs. 368,5 cm) mendukung kelayakan operasional Bendungan Leuwikeris, meski diperlukan mitigasi tambahan untuk skenario MDE (SNI 8067:2015). Secara teoretis, integrasi metode keseimbangan batas dan analisis dinamik memperkaya literatur teknik sipil, khususnya dalam manajemen risiko bendungan. Studi ini juga membuka peluang penelitian lanjutan, seperti pemodelan material alternatif atau simulasi dampak perubahan iklim terhadap fluktuasi muka air waduk.

METODE PENELITIAN

Pemodelan analisis stabilitas lereng dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak GEOSTUDIO 2021.1.0, khususnya modul Slope/W dan Seep/W. Slope/W dan Seep/W merupakan software analisis kesetimbangan batas yang canggih dan mampu menangani berbagai kompleksitas dalam kajian stabilitas lereng. Program ini menghitung tegangan geser pada bidang potensi longsor berdasarkan kekuatan geser tanah, untuk kemudian menentukan nilai faktor keamanan. Bidang longsor yang menghasilkan nilai faktor keamanan terendah dianggap sebagai bidang gelincir kritis.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan jenis penelitian deskriptif-analitik untuk mengevaluasi stabilitas Bendungan Leuwikeris berdasarkan parameter material timbunan dan pembebanan dinamik. Populasi data mencakup seluruh parameter teknis bendungan, termasuk data material timbunan (zona 1 hingga 4), data rembesan, dan rekaman seismik wilayah tersebut. Sampel data diambil secara purposive dengan kriteria spesifik, yaitu data uji laboratorium (triaxial CU-BP, direct shear, large-scale shear) dan hasil pengukuran lapangan (piezometer, permeabilitas) selama periode 2020–2024. Teknik pengambilan sampel mengacu pada probabilitas 80% terlampaui untuk memastikan konservatisme analisis, sesuai standar SNI 8064:2016. Instrumen penelitian meliputi alat uji geoteknik (triaxial apparatus, shear box), sensor piezometer, serta dokumen desain bendungan (as-built drawing). Validitas data diuji melalui kalibrasi instrumen dan perbandingan dengan standar ASTM D4767-11, sementara reliabilitas diperiksa dengan uji konsistensi internal menggunakan Cronbach's Alpha pada data parameter material.

Teknik pengumpulan data melibatkan studi lapangan (pengambilan sampel tanah, pemantauan tekanan air pori) dan studi literatur (pedoman ICOLD, SNI, dan jurnal terkait). Prosedur penelitian dimulai dengan identifikasi parameter material, dilanjutkan dengan pemodelan rembesan dan stabilitas lereng menggunakan perangkat lunak Geo-Studio 2023.1.0 (modul Slope/W dan Seep/W). Simulasi dilakukan untuk empat skenario: kondisi pasca-konstruksi, pengisian waduk (impounding), aliran langgeng (steady state), serta pembebanan gempa OBE dan MDE. Pemodelan dinamik menggunakan metode Makdisi-Seed untuk prediksi deformasi, dengan kalibrasi berbasis persamaan empiris Swaisgood (2003). Seluruh proses mengikuti protokol limit equilibrium method (LEM) dan standar keamanan bendungan SNI 03-2891-1992.

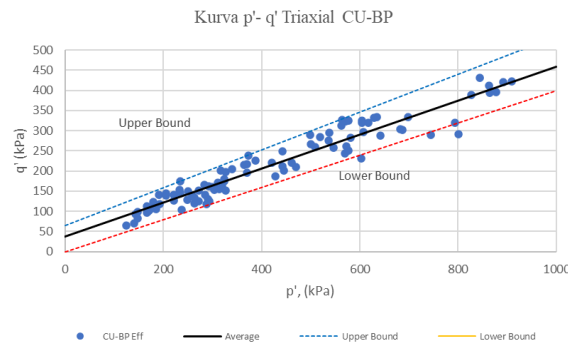
Analisis data dilakukan secara komparatif dengan membandingkan faktor keamanan (FK) hasil simulasi terhadap kriteria minimum (FK > 1.3 untuk kondisi statik, FK > 1.2 untuk gempa OBE). Hasil pemodelan divisualisasikan dalam grafik tegangan-regangan (p' - q') dan sebaran permeabilitas. Uji sensitivitas parameter material dilakukan untuk menilai pengaruh variasi berat volume dan sudut geser terhadap stabilitas. Data deformasi dianalisis secara statistik deskriptif (maksimum, rata-rata) dan dibandingkan dengan tinggi jagaan bendungan. Temuan divalidasi melalui peer review oleh ahli geoteknik dan perbandingan dengan studi serupa (Leps, 1976; Sosrodarsono, 1981). Hasil akhir disajikan dalam bentuk rekomendasi teknis untuk mitigasi risiko, termasuk optimasi material timbunan dan strategi pemantauan jangka panjang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

PARAMETER TIMBUNAN

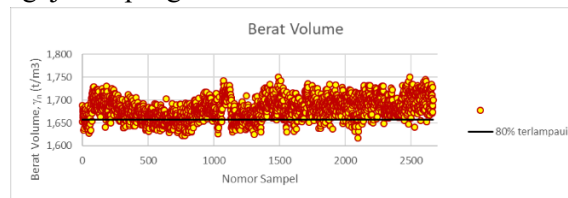
Material inti (zona 1)

adalah material berbutir halus yang bersifat kedap air. Parameter kuat geser material inti diperoleh dari perhitungan stress path hasil pengujian triaxial CU-BP dari 32 jumlah sampel pengujian.

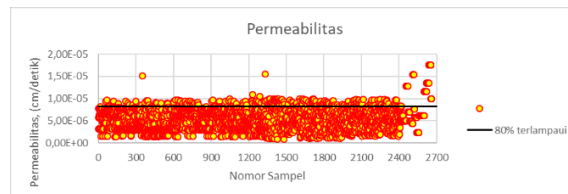


Gambar 1. Kurva p'-q' Triaxial CU-BP

Untuk parameter berat volume basah dan permeabilitas diperoleh dari perhitungan probabilitas 80% terlampaui seluruh pengujian lapangan.



Gambar 2. Sebaran Data Berat Volume Basah Material Timbunan Inti

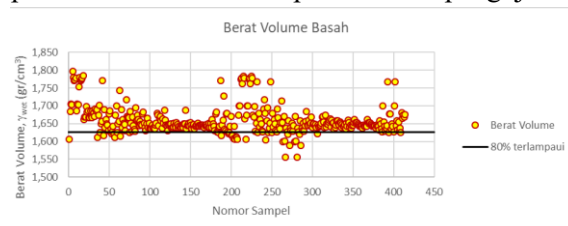


Gambar 3. Sebaran Data Permeabilitas Material Timbunan Inti

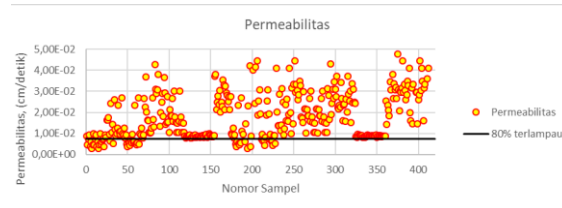
- a. Nilai berat volume basah, γ_{wet} adalah = 1,66 gr/cm³ atau 16,6 kN/m³
 - b. Nilai kohesi, c adalah = 0 kPa
 - c. Nilai sudut geser, ϕ adalah = 23°
- Nilai permeabilitas, k adalah = 8,3 x 10⁻⁶ cm/detik atau 8,3 x 10⁻⁸ m/detik.

Material Filter Halus (zona 2a)

Material filter halus (zona 2a) berupa material pasir halus dengan kandungan material yang lolos saringan #200 di bawah 5%. Parameter kuat geser material filter halus (zona 2a) diperoleh dari hasil pengujian *direct shear* laboratorium (data terlampir). Parameter berat volume basah dan permeabilitas diperoleh dari perhitungan probabilitas 80% terlampaui seluruh pengujian lapangan.



Gambar 4. Sebaran Data Berat Volume Basah Material Timbunan Filter Halus



Gambar 5. Sebaran Data Permeabilitas Material Timbunan Filter Halus

- a. Nilai berat volume basah, γ_{wet} adalah = 1,63 gr/cm³ atau 16,3 kN/m³
- b. Nilai kohesi, c adalah = 0 kPa
- c. Nilai sudut geser, ϕ adalah = 30,5°
- d. Nilai permeabilitas, k adalah = 7,4 x 10⁻³ cm/detik atau 7,4 x 10⁻⁵ m/detik

Material Filter Kasar (zona 2b)

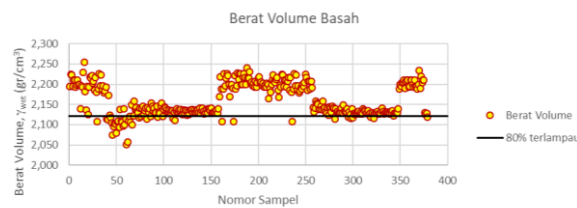
Material filter kasar (zona 2b) berupa material pasir - kerikil dengan kandungan material yang lolos saringan #200 di bawah 5%. Parameter kuat geser material filter kasar diambil dari parameter empiris burtlook.

Pengambilan nilai bersifat konservatif yaitu *cohesionless gravels* (nilai kohesi = 0 kPa) dengan pemadatan yang *very loose/loose* (tidak dipadatkan dengan baik). Nilai sudut geser yang diambil adalah 33°.

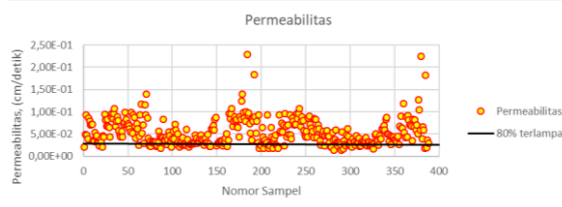
Tabel 1. Typical friction angle of granular soils, Look:2014

Type	Description/state	Friction angle (degrees)
Cohesionless	Soft sedimentary (Chalk, shale, siltstone, coal)	30–40
Compacted broken rock	Hard sedimentary (Conglomerate, sandstone)	35–45
	Metamorphic	35–45
	Igneous	40–50
Cohesionless Gravels	Very loose/loose	30–34
	Medium dense	34–39
	Dense	39–44
	Very dense	44–49
Cohesionless Sands	Very loose/loose	27–32
	Medium dense	32–37
	Dense	37–42
	Very dense	42–47
Cohesionless Sands	Loose – uniformly graded	27–30
	Loose – well graded	30–32
	Dense – uniformly graded	37–40
	Dense – well graded	40–42

Parameter berat volume basah diperoleh dari perhitungan probabilitas 80% terlampaui seluruh pengujian lapangan yang direduksi 10%.



Gambar 6. Sebaran Data Berat Volume Basah Material Timbunan Filter Kasar



Gambar 7. Sebaran Data Permeabilitas Material Timbunan Filter Kasar

Parameter permeabilitas diperoleh dari perhitungan probabilitas 80% terlampaui seluruh pengujian lapangan.

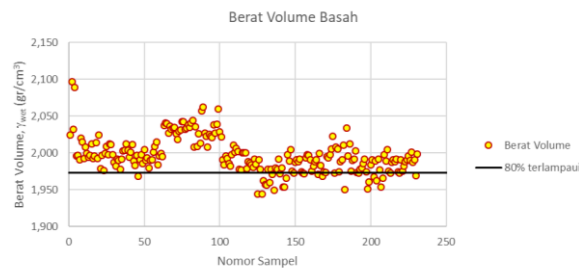
- a. Nilai i berat volume basah, γ_{wet} adalah= 1,9 gr/cm³ atau 19, kN/m³
- b. Nilai kohesi, c adalah = 0 kPa

c. Nilai sudut geser, ϕ adalah = $33,0^\circ$

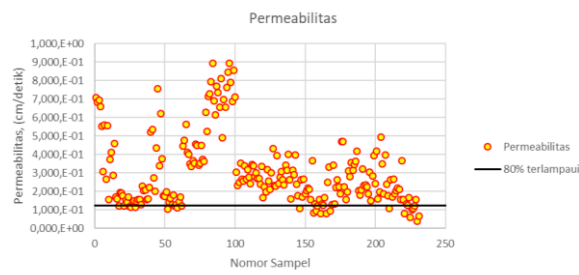
Nilai permeabilitas, k adalah = $2,7 \times 10^{-2}$ cm/detik atau $2,7 \times 10^{-4}$ m/detik

Material Rockfill (zona 3)

Material batu/rockfill (zona 3) berupa material hasil peledakan dari *quarry* batu Gunung Panghajar. Parameter berat volume basah dan permeabilitas diperoleh dari perhitungan probabilitas 80% terlampaui seluruh pengujian lapangan. Untuk parameter kuat geser diambil berdasarkan uji *Large Scale Direct Shear* yang dilaksanakan di laboratorium (data terlampir).



Gambar 8. Sebaran Data Berat Volume Basah Material Timbunan Batu (Rockfill)



Gambar 9. Sebaran Data Permeabilitas Material Timbunan Batu (Rockfill)

a. Nilai berat volume basah, γ_{wet} adalah = $1,98$ gr/cm³ atau $19,8$ kN/m³

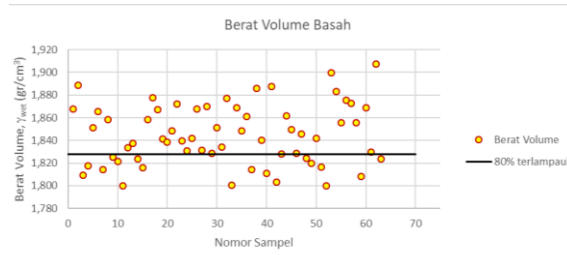
b. Nilai kohesi, c adalah = 0 kPa

c. Nilai sudut geser, ϕ adalah = $40,0^\circ$

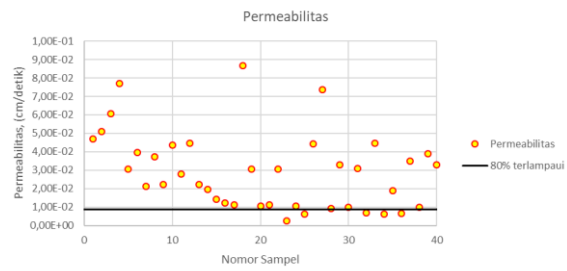
d. Nilai koefisien permeabilitas, k adalah = $1,2 \times 10^{-1}$ cm/detik atau $1,2 \times 10^{-3}$ m/detik

Material Random (zona 3a)

Material random yang digunakan berasal dari hasil galian pondasi pelimpah (*spillway*). Pada tahap awal penimbunan, material yang digunakan didominasi oleh material bergradasi kasar. Namun, seiring berjalannya proses konstruksi, volume material bergradasi kasar ternyata tidak mencukupi, sehingga digunakan material dengan kandungan butiran halus yang lebih tinggi. Dalam pemodelan analisis, material ini dipisahkan menjadi dua jenis, yaitu random dengan dominasi gradasi kasar (zona 3a) dan random dengan kandungan material bergradasi halus yang lebih tinggi (zona 3a'). Parameter kohesi dan kuat geser diambil dari hasil uji *Large Scale Direct Shear*. Pengambilan parameter berat volume basah dan koefisien permeabilitas material random (zona 3a) diambil dari hasil perhitungan probabilitas 80% terlampaui seluruh pengujian lapangan.



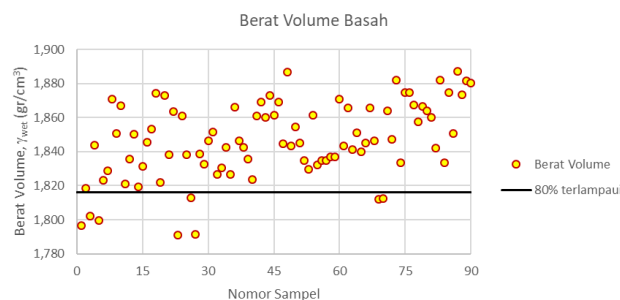
Gambar 10. Sebaran Data Berat Volume Basah Material Timbunan Random (3a)



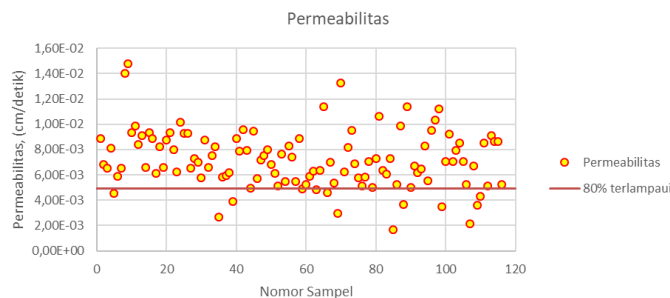
Gambar 11. Sebaran Data Permeabilitas Material Timbunan Random (3a)

- a. Nilai berat volume basah, γ_{wet} adalah = 1,82 gr/cm³ atau 18,2 kN/m³
- b. Nilai kohesi, c adalah = 0,028 kg/cm² atau 2,8 kPa
- c. Nilai sudut geser, ϕ adalah = 33,0°
- d. Nilai koefisien permeabilitas, k adalah = 8,6 x 10⁻³ cm/detik atau 8,6 x 10⁻⁵ m/detik

Pengambilan nilai berat volume basah dan koefisien permeabilitas material random (zona 3a') diambil dari hasil perhitungan probabilitas 80% terlampaui seluruh pengujian lapangan. Parameter kuat geser material random eks galian *spillway* (zona 3a') berdasarkan hasil uji *Large Scale Direct Shear* (data terlampir).



Gambar 12. Sebaran Data Berat Volume Basah Material Timbunan Random (3a')



Gambar 13. Sebaran Data Permeabilitas Material Timbunan Random (3a')

- a. Nilai berat volume basah, γ_{wet} adalah = 1,82 gr/cm³ atau 18,0 kN/m³
- b. Nilai kohesi, c adalah = 24,0 kPa
- c. Nilai sudut geser, ϕ adalah = 20,0°
- d. Nilai koefisien permeabilitas, k adalah = 4,9 x 10⁻³ cm/detik atau 4,9 x 10⁻⁵ m/detik

Material Riprap (zona 4)

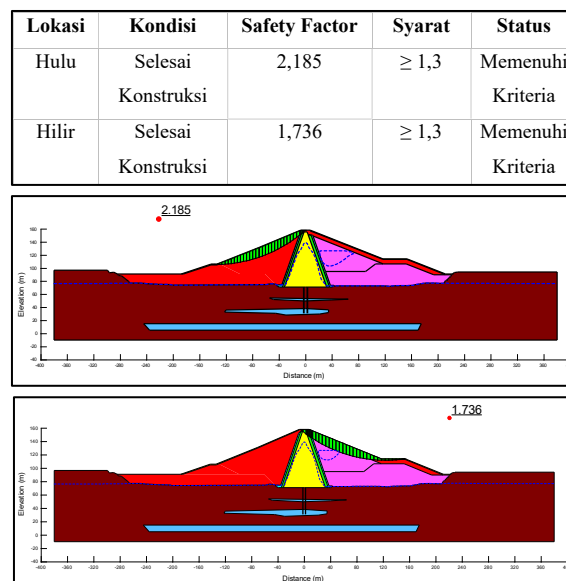
Material riprap (zona 4) pada dasarnya tidak berkontribusi signifikan terhadap keamanan stabilitas lereng bendungan dikarenakan ketebalan fungsi material riprap (khususnya sisi hulu) berfungsi sebagai pelindung erosi jika ada perubahan tinggi muka air waduk. Namun tetap dilakukan pemodelan dengan parameter sama dengan material *rockfill* (zona 3).

Analisis stabilitas lereng pada Bendungan Leuwikeris dilakukan dengan beberapa skenario, Analisis keamanan Bendungan Leuwikeris menggunakan perangkat lunak GEO-Studio 2023.1.0.

Kondisi Selesai Konstruksi (after construction)

SNI 8064:2016 menunjukkan skenario dan syarat faktor keamanan minimum analisis stabilitas lereng bendungan. analisis stabilitas lereng kondisi setelah konstruksi (*after construction*) dianalisis tanpa beban gempa (statik) dan dengan 50% beban gempa desain OBE. Titik tinjau pada kondisi selesai konstruksi dilakukan pada sisi hulu dan hilir. Tekanan air pori pada analisis diperoleh dari data pembacaan piezometer pada bendungan.

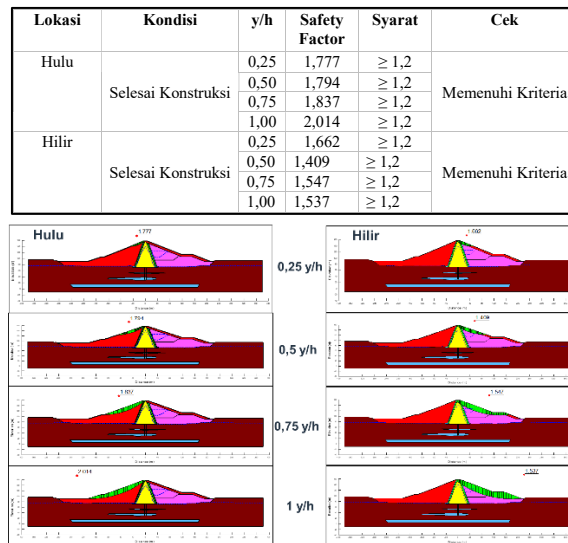
Hasil analisa stabilitas lereng Bendungan Leuwikeris dengan kondisi setelah konstruksi (*after construction*) yang dihitung dengan skenario tanpa beban gempa dan 50% beban gempa OBE dapat dilihat pada gambar berikut



Gambar 14. Hasil analisis keamanan kondisi after construction tanpa beban gempa (statik) hulu dan hilir

50% OBE (*Operated Based Earthquake*)

Hasil analisis keamanan Bendungan Leuwikeris kondisi selesai konstruksi (*after construction*) dengan skenario pembebanan 50% gempa OBE (*Operated Based Earthquake*) dapat dilihat pada tabel dan gambar berikut

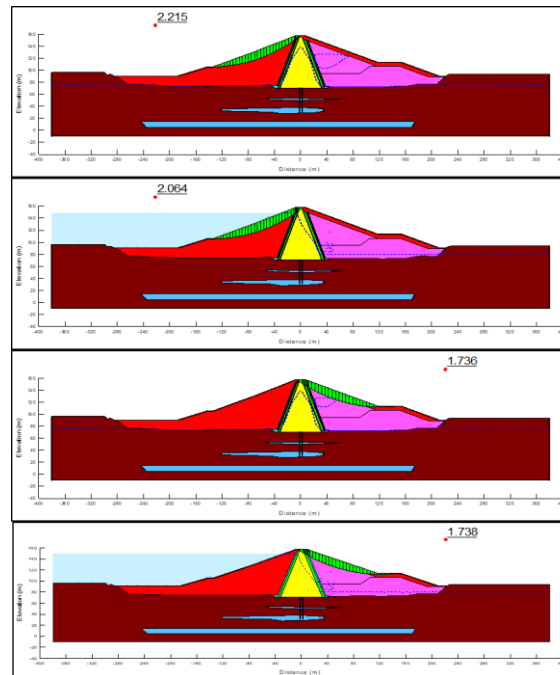


Gambar 15. Hasil analisis keamanan kondisi selesai konstruksi (beban gempa 50% OBE) hulu dan hilir

Kondisi Pengisian Awal Waduk (*Impounding*)

Hasil simulasi pengisian awal (*impounding*) yang dimulai pada bulan Juni, Juli, Agustus, dan September. Dari elevasi pengelak pada +85 m, muka air mengalami peningkatan signifikan hingga mencapai elevasi +139,321 m (pintu pelimpah) tanpa adanya bangunan pengeluaran untuk mengendalikannya. Pada skenario paling ekstrem, yaitu *impounding* yang dimulai pada 15 Juni 2024, elevasi intake (+133,254 m) akan tercapai dalam waktu 11 hari, dengan rata-rata kenaikan muka air sebesar 4,1 m per hari. Kenaikan rata-rata muka air dapat diminimalkan dengan memulai *impounding* pada bulan-bulan berikutnya, yaitu Juli, Agustus, dan September, dengan rata-rata kenaikan hingga mencapai elevasi intake masing-masing sebesar 1,7 m/hari; 0,7 m/hari; dan 1,0 m/hari

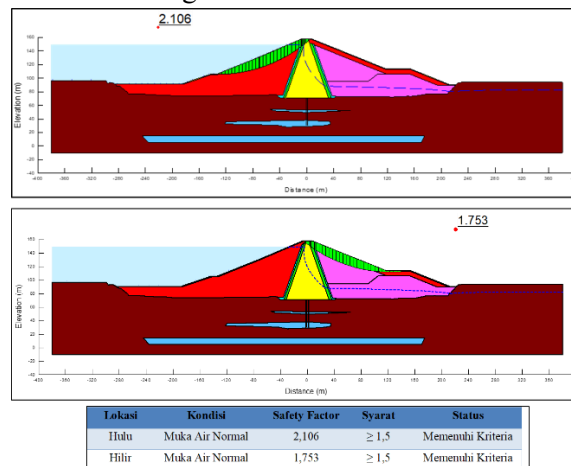
Lokasi	Waktu (hari)	Safety Factor	Syarat	Status
Hulu	0	2,18	$\geq 1,3$	Memenuhi Kriteria
	3	2,18	$\geq 1,3$	
	6	2,14	$\geq 1,3$	
	9	1,99	$\geq 1,3$	
	12	1,97	$\geq 1,3$	
	15	2,04	$\geq 1,3$	
	18	2,06	$\geq 1,3$	
Hilir	0	1,74	$\geq 1,3$	Memenuhi Kriteria
	3	1,74	$\geq 1,3$	
	6	1,74	$\geq 1,3$	
	9	1,74	$\geq 1,3$	
	12	1,74	$\geq 1,3$	
	15	1,74	$\geq 1,3$	
	18	1,74	$\geq 1,3$	



Gambar 16. Hasil analisis keamanan kondisi pengisian waduk (impounding) tanpa beban gempa (statik) sisi hulu dan hilir

Kondisi Aliran Langug (steady state) Muka Air Normal

Analisis kondisi aliran langug (muka air normal) dilakukan dengan mempertimbangkan tiga skenario: tanpa gempa (statik), pembebanan gempa OBE (operating-based earthquake), dan pembebanan gempa MDE (maximum design earthquake). Peninjauan dilakukan pada sisi hulu dan hilir bendungan. Tekanan air pori yang digunakan dalam analisis diperoleh dari hasil analisis rembesan dengan skenario muka air normal bendungan.

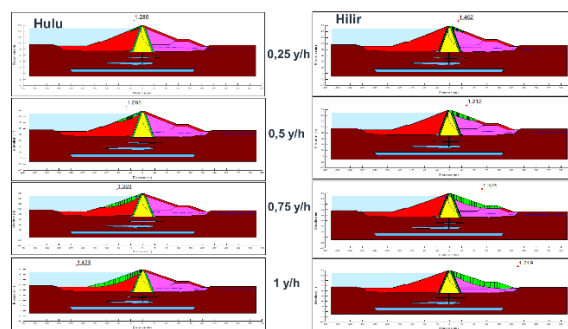


Gambar 17. Hasil analisis keamanan kondisi aliran langug (muka air normal) tanpa beban gempa (statik)

Steady state gempa OBE (Operated Based Earthquake)

Hasil analisis keamanan Bendungan Leuwikeris pada kondisi aliran langug (muka air normal) dengan skenario dengan skenario pembebanan gempa OBE (Operated Based Earthquake) dapat dilihat pada tabel berikut:

Lokasi	Kondisi	y/h	Safety Factor	Syarat	Cek
Hulu	Muka Air Normal	0,25	1,280	$\geq 1,2$	Memenuhi Kriteria
		0,50	1,265	$\geq 1,2$	
		0,75	1,303	$\geq 1,2$	
		1,00	1,423	$\geq 1,2$	
Hilir	Muka Air Normal	0,25	1,402	$\geq 1,2$	Memenuhi Kriteria
		0,50	1,212	$\geq 1,2$	
		0,75	1,324	$\geq 1,2$	
		1,00	1,319	$\geq 1,2$	

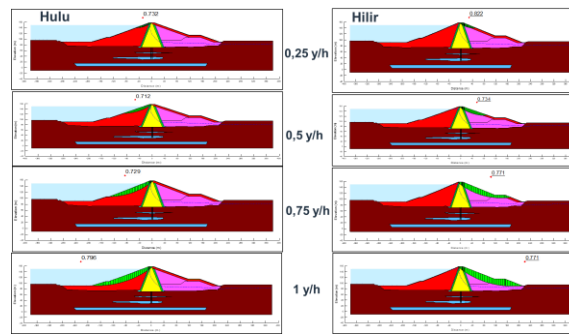


Gambar 18. Hasil analisis keamanan kondisi aliran langgeng (beban gempa OBE)

Steady state dengan gempa MDE (*Maximum Design Earthquake*)

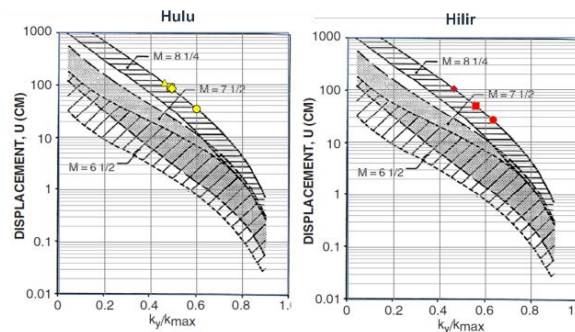
Hasil analisis keamanan Bendungan Leuwikeris pada kondisi aliran langgeng (muka air normal) dengan skenario pembebanan gempa MDE dapat dilihat pada tabel 6.10 berikut.

Lokasi	Kondisi	y/h	Safety Factor	Syarat	Cek
Hulu	Muka Air	0,25	0,732	$\geq 1,0$	Cek deformasi
		0,50	0,712	$\geq 1,0$	
	Normal	0,75	0,729	$\geq 1,0$	
		1,00	0,796	$\geq 1,0$	
Hilir	Muka Air	0,25	0,822	$\geq 1,0$	Cek deformasi
		0,50	0,734	$\geq 1,0$	
	Normal	0,75	0,771	$\geq 1,0$	
		1,00	0,771	$\geq 1,0$	



Gambar 19. Hasil analisis keamanan kondisi aliran langgeng (beban gempa MDE)

Berdasarkan nilai angka keamanan pada analisa stabilitas dengan beban gempa MDE yang menunjukkan angka <1, maka kemudian dilakukan perhitungan analisa lebih lanjut menggunakan metode makdisi seed untuk menghitung besar deformasi yang terjadi pada masing-masing elevasi terhadap tinggi jagaan. Apabila nilai deformasi masih lebih kecil dari tinggi jagaan maka nilai tersebut memenuhi kriteria keamanan bendungan



Gambar 20. Grafik Deformasi Sisi Hulu (kuning) dan Hilir (merah) berdasarkan Metode Makdisi-Seed

Tabel 2. Hasil analisis deformasi terhadap tinggi jagaan metode Makdisi-Seed

Lokasi	y/h	Deformasi (cm)	50% Tinggi Jagaan (cm)	Syarat Deformasi	Cek
Hulu	0,25	90	368,5	≤ 50% Tinggi Jagaan	Memenuhi Kriteria
	0,50	110	368,5	≤ 50% Tinggi Jagaan	Memenuhi Kriteria
	0,75	85	368,5	≤ 50% Tinggi Jagaan	Memenuhi Kriteria
	1,00	35	368,5	≤ 50% Tinggi Jagaan	Memenuhi Kriteria
Hilir	0,25	35	368,5	≤ 50% Tinggi Jagaan	Memenuhi Kriteria
	0,50	27	368,5	≤ 50% Tinggi Jagaan	Memenuhi Kriteria
	0,75	105	368,5	≤ 50% Tinggi Jagaan	Memenuhi Kriteria
	1,00	53	368,5	≤ 50% Tinggi Jagaan	Memenuhi Kriteria

Berdasarkan hasil perhitungan deformasi makdisi seed diatas, maka dapat disimpulkan bahwa kondisi stabilitas pada masing-masing elevasi pada lereng bendungan masih berada dibawah tinggi jagaan yang artinya memenuhi kriteria/aman terhadap kriteria keamanan bendungan

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa stabilitas Bendungan Leuwikeris secara umum memenuhi kriteria keamanan pada kondisi konstruksi dan pengisian waduk dengan faktor keamanan (FK) di atas batas minimum ($FK > 1,3$ untuk kondisi statis dan $FK > 1,2$ untuk gempa OBE). Namun, pada skenario gempa MDE, FK turun di bawah 1,0, meskipun analisis deformasi dengan metode Makdisi-Seed menunjukkan bahwa pergeseran maksimum (110 cm) masih dalam batas toleransi tinggi jagaan (368,5 cm). Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun bendungan tetap aman dari risiko keruntuhan, diperlukan langkah-langkah mitigasi tambahan untuk meningkatkan ketahanan terhadap gempa besar. Material timbunan, terutama pada zona inti (zona 1) dan filter (zona 2a dan 2b), memberikan kontribusi signifikan terhadap stabilitas, sementara rembesan dan fluktuasi muka air waduk berpengaruh terhadap tekanan air pori yang memengaruhi stabilitas lereng. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk melakukan studi lebih mendalam mengenai penggunaan material alternatif dengan parameter geser yang lebih baik, khususnya pada zona inti, untuk meningkatkan ketahanan terhadap gempa MDE. Selain itu, pemodelan dinamik dengan metode yang lebih canggih, seperti analisis elemen hingga (FEM), dapat memberikan hasil yang lebih akurat dalam memprediksi respons bendungan terhadap beban seismik. Penelitian lanjutan juga dapat mencakup pemantauan real-time menggunakan sensor canggih untuk mengukur tekanan air pori dan deformasi secara kontinu, serta evaluasi dampak perubahan iklim terhadap fluktuasi muka air waduk. Dengan demikian, rekomendasi yang dihasilkan dapat lebih komprehensif dan aplikatif dalam meningkatkan keandalan Bendungan Leuwikeris serta bendungan sejenis di wilayah rawan gempa.

DAFTAR PUSTAKA

- Azdan, M., & Samekto, R. (2008). "Kegagalan Bendungan dan Solusinya". Jakarta: Penerbit Teknik Sipil Indonesia.
- Abdurrahman, M., Nurhadi, T., & Fauzi, R. (2017). Pengaruh gempa terhadap stabilitas lereng pada struktur bendungan. *Jurnal Teknik Sipil*, 10(3), 45-56. <https://doi.org/10.1016/j.jts.2017.03.002>
- Departemen Pekerjaan Umum. (2017). Peta Gempa Indonesia 2017. Badan Geologi dan Geodesi.
- Husni, I., Sumantri, A., & Daryanto, R. (2018). Pedoman analisis stabilitas bendungan tipe urugan akibat beban gempa. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Hibatulloh, M. Ilyas. (2024). *Optimasi Proporsi Bahan Substitusi dalam Campuran Beton Terhadap Kuat Tekan menggunakan Metode Artificial Neural Network*. Universitas Islam Indonesia.
- Kurniawan, A., Yuliana, D., & Hanif, M. (2019). Stabilitas lereng pada bendungan dalam kondisi gempa. *Jurnal Geoteknik*, 15(2), 111-120. <https://doi.org/10.1016/j.jgt.2019.01.014>
- Pratama, D. (2021). Kajian gempa terhadap stabilitas struktur bangunan bendungan. *Jurnal Teknik Geologi*, 13(4), 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.jtg.2021.03.013>

- Setiawan, I., Purnomo, T., & Rahman, A. (2020). Analisis stabilitas lereng menggunakan data seismik terkini. *Jurnal Rekayasa Struktural*, 22(1), 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.jrs.2020.02.007>
- Sumarno, B., Hidayat, F., & Supriyadi, D. (2022). Evaluasi pengaruh gempa terhadap struktur bendungan pada wilayah rawan gempa. *Jurnal Manajemen Risiko Bencana*, 14(3), 209-220. <https://doi.org/10.1016/j.jmrb.2022.05.009>
- ICOLD (International Commission on Large Dams). (2011). "Guidelines for the Design and Construction of Dams". Paris: ICOLD Publications.
- Lontoh, E., Simbolon, F., & Hasibuan, A. (2020). "Faktor-Faktor Penyebab Longsor pada Bendungan Tanah". *Jurnal Ilmu Teknik Sipil*, 18(3), 233-245.
- Leps, T. M. (1976). "Soil Mechanics in Dam Engineering". *Journal of Geotechnical Engineering*, 102(4), 123-145.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 37 Tahun 2010 tentang Bendungan.
- Rahman, D., Syarifuddin, A., & Wibowo, T. (2014). "Analisis Fluktuasi Air dan Stabilitas Bendungan Homogen". Bandung: Pustaka Teknik Sipil.
- Sosrodarsono, S. (1981). "Bendungan". Jakarta: Pradnya Paramita.