

ANALISIS STABILITAS LERENG BENDUNGAN I TUJUH BUKIT TUMPANG PITU BANYUWANGI

Widde Valensia¹, Yanyan Agustian²

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik^{1,2}

Universitas Widyatama

Jalan Cikutra No 204 A, Sukapada, Kec. Cibeunying Kidul, Kota Bandung, Jawa Barat

vwidde@gmail.com¹, yanyan.agustian@widyatama.ac.id²

Abstrak

Keberhasilan operasional sebuah bendungan sangat dipengaruhi oleh stabilitas lereng dan keamanan terhadap rembesan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi stabilitas lereng dan keamanan rembesan pada Bendungan Tujuh Bukit 1, yang telah beroperasi selama lima tahun. Metode penelitian meliputi pengumpulan data primer dan sekunder, diikuti dengan pembuatan model analisis. Analisis stabilitas lereng dilakukan dalam tiga kondisi: kondisi statik, gempa *Operated Based Earthquake* (OBE), dan gempa *Maximum Design Earthquake* (MDE). Selain itu, model analisis rembesan dikembangkan untuk menilai keamanan terhadap tekanan uplift dan erosi buluh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa stabilitas lereng pada kondisi statik, OBE, dan MDE memenuhi kriteria keamanan yang diperlukan. Faktor keamanan yang dihitung untuk setiap skenario menunjukkan bahwa lereng bendungan stabil dan mampu menahan beban yang ditentukan. Demikian pula, hasil analisis rembesan menunjukkan bahwa Bendungan Tujuh Bukit 1 aman terhadap uplift dan erosi buluh, tanpa risiko signifikan erosi internal atau kehilangan material yang dapat membahayakan struktur. Berdasarkan hasil analisis ini, tidak diperlukan modifikasi desain atau perkuatan tambahan untuk Bendungan Tujuh Bukit 1. Desain dan konstruksi saat ini memadai untuk memastikan keamanan dan stabilitas bendungan dalam kondisi yang dievaluasi. Temuan ini memberikan keyakinan mengenai keandalan operasional bendungan dan wawasan berharga untuk strategi pemantauan dan pemeliharaan mendatang. Penelitian ini menekankan pentingnya evaluasi keamanan rutin untuk bendungan dan menyoroti efektivitas model analitis dalam menilai stabilitas dan masalah rembesan.

Kata kunci : Stabilitas lereng, kewanan rembesan, Bendungan Tujuh Bukit I

Abstract

The operational success of a dam is significantly influenced by slope stability and seepage safety. This study aims to evaluate the slope stability and seepage safety of the Tujuh Bukit 1 Dam, which has been in operation for five years. The research methodology involves the collection of both primary and secondary data, followed by the development of analysis models. The slope stability analysis was conducted under three conditions: static, Operated Based Earthquake (OBE), and Maximum Design Earthquake (MDE). Additionally, a seepage analysis model was developed to assess safety against uplift pressure and piping erosion. The results indicate that slope stability under static, OBE, and MDE conditions meets the required safety criteria. The factors of safety calculated for each scenario demonstrate that the dam slopes are stable and capable of withstanding the specified loads. Similarly, the seepage analysis results show that the Tujuh Bukit 1 Dam is safe against both uplift and piping erosion, with no significant risk of internal erosion or material loss that could compromise the structure. Based on these analysis results, no additional design modifications or reinforcements are required for the Tujuh Bukit 1 Dam. The current design and construction are adequate to ensure the dam's safety and stability under the evaluated conditions. These findings provide confidence in the dam's operational reliability and valuable insights for future monitoring and maintenance strategies. This study underscores the importance of regular safety evaluations for dams and highlights the effectiveness of detailed analytical models in assessing stability and seepage concerns.

Keywords: Slope Stability, Seepage Safety, Tujuh Bukit 1 Dam

I. PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Bendungan harus mampu beroperasi sesuai kebutuhan pemilik tanpa terjadi kegagalan (Matsumoto, 2008). Salah satu kegagalan yang sering terjadi disebabkan oleh kelongsoran lereng bendungan. Longsor dapat terjadi karena berbagai faktor, termasuk penurunan kekuatan tanah, peningkatan beban di lereng, erosi (*piping*) pada tanah berbutir, dan beban seismic dan juga likuefaksi (Agustian, 2021). Pemilihan material dan pengontrolan bendungan terhadap rembesan air juga menjadi hal penting untuk menghindari kelongsoran.

Analisis kestabilan lereng bendungan dalam kondisi statik dan seismic perlu dilakukan saat tahap perencanaan. Dalam analisis kestabilan kondisi statik, umumnya naik turunnya air pada bendungan menjadi salah satu perhatian utama (Akhlaghi dan Nikkar, 2014). Kenaikan muka air di bagian hulu menyebabkan peningkatan tekanan air pori pada tubuh bendungan. Kondisi ini diikuti penurunan tahanan efektif tanah urugan sehingga kestabilan hilir lereng bendungan menjadi kritis. Penilaian kestabilan lereng perlu secara menerus dilakukan sebagai kontrol kestabilannya sebagai dasar pengambilan keputusan (Agustian, et. al, 2024) Untuk analisis kestabilan kondisi seismic, evaluasi perlu dilakukan untuk menentukan besar beban gempa dan nilai perpindahan tubuh bendungan saat menerima beban tersebut (Melo & Sharma, 2004).

I.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka dapat ditentukan rumusan masalah pada penelitian ini ialah sebagai berikut:

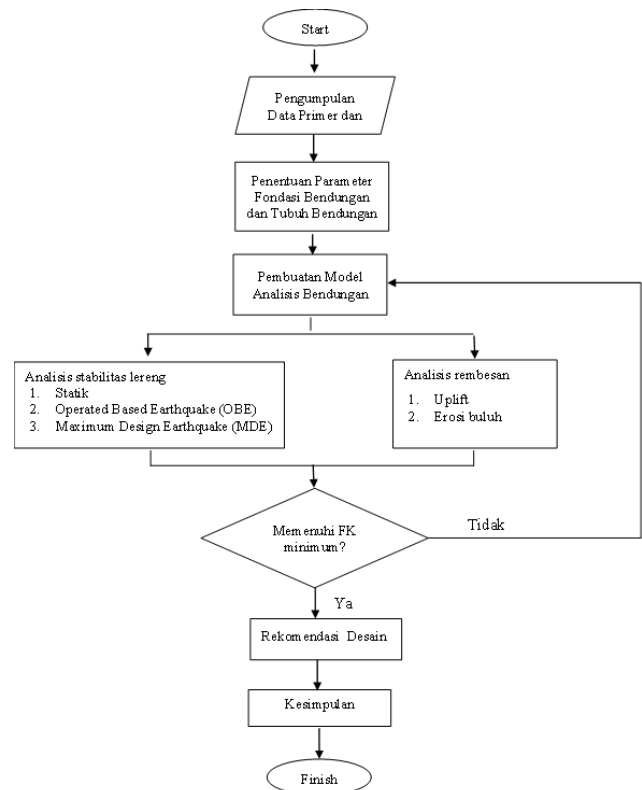
1. Bagaimana karakteristik pondasi di daerah Bendungan 1 Tujuh Bukit?
2. Bagaimana hasil dari analisis stabilitas yang terjadi dari review Bendungan 1 Tujuh Bukit?
3. Bagaimana hasil dari analisis keamanan rembesan berdasarkan review penampang timbunan bendungan?
4. Bagaimana desain lereng yang memenuhi kriteria sehingga didapatkan kondisi aman untuk Bendungan 1 Tujuh Bukit?

I.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, berikut merupakan tujuan dari penelitian ini:

1. Mengetahui kondisi geoteknis tanah di daerah bendungan
2. Mendapatkan hasil analisis stabilitas desain berdasarkan review penampang timbunan bendungan.
3. Mendapatkan hasil analisis stabilitas dengan beban gempa desain berdasarkan review penampang timbunan bendungan.
4. Mendapatkan hasil analisis keamanan rembesan berdasarkan review penampang timbunan bendungan.

II. METODE PENELITIAN



Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode analisis deskriptif (Setiawan, 2023), yaitu dengan melakukan pengumpulan data primer maupun sekunder kemudian dilakukan sebuah evaluasi dengan analisis.

Adapun berdasarkan Gambar 1. diagram alir metodologi terdapat enam tahap yang penting dalam prosesnya yaitu adalah pengumpulan data, penentuan

parameter, pembuatan model, analisis stabilitas lereng, analisis keamanan rembesan, dan pembuatan rekomendasi desain jika diperlukan.

II.1 Pengumpulan Data

Langkah awal pengerjaan yang dilakukan pada tahap ini adalah mengumpulkan nilai-nilai parameter geoteknik yang dibutuhkan dalam analisis. Selain parameter geoteknik gambar model dari Bendungan 1 Tujuh Bukit juga diperlukan.

Data pengambilan parameter sendiri didapatkan dari data primer dan juga sekunder. Untuk data primer dilakukan pengambilan sampel tanah dari Bendungan 1 Tujuh Bukit dan untuk gambar model serta beberapa data yang tidak dilakukan pengujian geoteknik diambil dari data sekunder.

II.2 Penentuan Parameter

Setelah melakukan pengumpulan data, dilakukan penentuan parameter geoteknik yang akan diinput ke dalam perangkat lunak Geostudio (Devi and Anbalagan, 2017). Penentuan parameter disesuaikan berdasarkan jenis karakteristik dari masing-masing tanah yaitu pada material tubuh bendungan dan pondasi. Tubuh bendungan terbagi ke dalam jenis tanah Zona A dan Zona C. Untuk fondasi terbagi menjadi tiga jenis yaitu adalah material *colluvium clay* kemudian batuan diorit yang mengalami pelapukan serta yang sudah fresh semakin ke dalam.

II.3 Pembuatan Model

Apabila penentuan parameter telah selesai, langkah selanjutnya adalah pembuatan model bendungan. Pembuatan model bendungan ini menyesuaikan dari bentuk tubuh Bendungan 1 Tujuh Bukit serta lapisan pondasinya. Kemudian pembuatan model ini juga disesuaikan dengan penambahan posisi dari letak instrumentasi pizometer yang terdapat pada bendungan. Pembuatan model disesuaikan untuk analisisnya. Model yang dibuat adalah model untuk melakukan analisis stabilitas lereng serta model untuk melakukan analisis rembesan (Yu et al., 2022).

II.4 Analisis Stabilitas Lereng

Analisis stabilitas lereng Bendungan 1 Tujuh Bukit meliputi 3 kondisi yaitu dalam kondisi statik atau tanpa gempa, gempa OBE (*Operated Based Earthquake*), dan gempa MDE (*Maximum Designed Earthquake*) menurut Stamatovska (2010).

Metode yang digunakan dalam perhitungan analisis stabilitas lereng adalah keseimbangan batas dengan metode spencer. Perangkat lunak yang digunakan dalam analisis adalah Geostudio SLOPE/W (Nalgire et al., 2020). Hasil yang didapatkan dari perhitungan analisis keseimbangan batas adalah nilai angka keamanan. Nilai angka keamanan merupakan perbandingan nilai kekuatannya dibandingkan dengan nilai bebannya.

Nilai batas minimum persyaratan dinyatakan aman untuk kondisi statik yang digunakan adalah 1,5. Untuk kondisi gempa OBE, nilai batas minimum persyaratan adalah 1,2. Kemudian untuk kondisi gempa MDE, nilai batas minimum persyaratan adalah 1. Kondisi gempa MDE diperbolehkan memiliki nilai di bawah angka 1 jika nilai alihan tetap yang terjadi tidak melebihi 50% tinggi jagaan.

II.5 Analisis Keamanan Rembesan

Analisis keamanan rembesan Bendungan 1 Tujuh Bukit dilakukan pengecekan terhadap uplift dan erosi buluh. Untuk pengecekan terhadap uplift angka keamanan minimum yang dipersyaratkan adalah 1,5 dengan tipe bendungan eksisting. Untuk pengecekan terhadap erosi buluh nilai angka keamanan minimum yang dipersyaratkan adalah 3 dengan tipe bendungan eksisting (Nalgire et al., 2020).

Metode perhitungan yang digunakan metode elemen hingga. Adapun perangkat lunak yang digunakan dalam perhitungan adalah Geostudio SEEP/W.

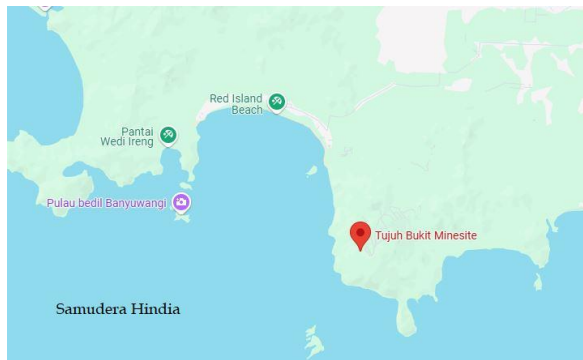
II.6 Pembuatan Rekomendasi Desain

Apabila pada tahap analisis stabilitas lereng dan analisis keamanan rembesan tidak memenuhi perlu untuk dibuat rekomendasi desain yang memenuhi. Rekomendasi desain ini dapat merubah kemiringan dari bendungan atau dapat juga berupa penambahan material sebagai *counterweight* apabila diperlukan.

III. ANALISIS DATA

III.1 Umum

Bendungan Tujuh bukit terdiri dari 6 bendungan yang terdapat di lokasi penambangan dikelola oleh PT Bumi Suksesindo dan PT Merdeka Copper Gold. Lokasi penambangan berlokasi di Kabupaten Banyuwangi, Jawa Timur. Gambar 2. Adalah lokasi bendungan yang menjadi objek pada penelitian ini.



Gambar 2. Lokasi Bendungan Tujuh Bukit

Dalam penelitian ini dilakukan evaluasi kondisi Bendungan 1 yang merupakan bendungan paling besar di lokasi. Bendungan Tujuh Bukit dibangun untuk mencukupi kebutuhan air bersih di lingkungan tambang PT Merdeka Copper Gold. Adapun data teknis dari bendungan tujuh bukit termuat dalam Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Data Teknis Bendungan Tujuh Bukit 1

No	Uraian	Nilai
1	Elev. Puncak Bendungan (m)	20,5
2	Elev. Muka Air pada Q 1000 tahun	20,0
3	Elev. Puncak Pelimpah (m)	19,0
4	Elev. Dasar, udik downstream (m)	9,0
5	Tinggi Maksimum Bendungan (m)	11,5
6	Jagaan Normal	1,5
7	Jagaan Minimum	0,5
8	Lebar Puncak Bendungan	10,0
9	Bentang Bendungan	400,0
10	Vol. Tampungan s/d Elev. Puncak Pelimpah (m3)	389.000

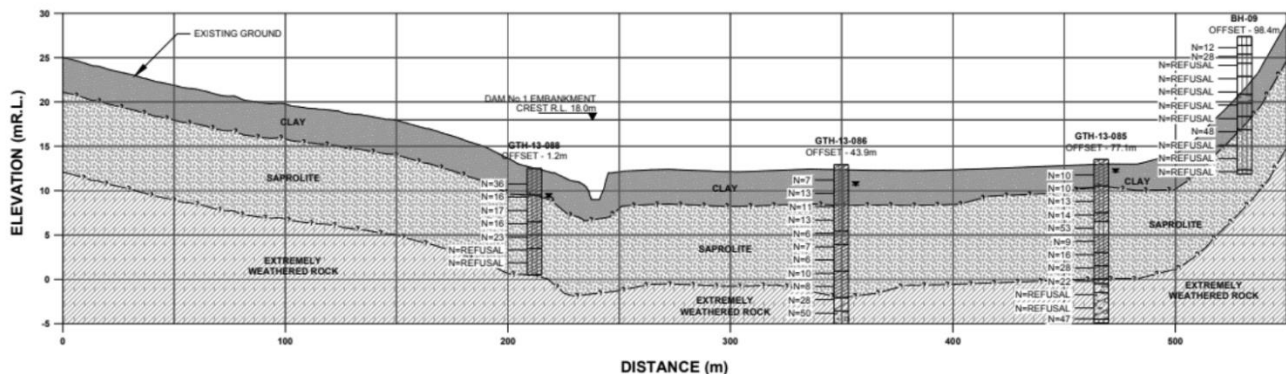
No	Uraian	Nilai
11	Vol. Tampungan s/d Elev. Puncak Bendungan (m3)	611.000
12	Kemiringan Lereng Bendungan Upstream	1:3
13	Kemiringan Lereng Bendungan Downstream	1:3
14	Lebar Pelimpah (m)	5.0
15	Kemiringan Talud Pelimpah	1:7
16	Luas genangan (m2)	161.586
17	Luas Daerah Tangkapan Air (m2)	494.700

III.2 Karakteristik Geoteknik dan Tubuh Bendungan

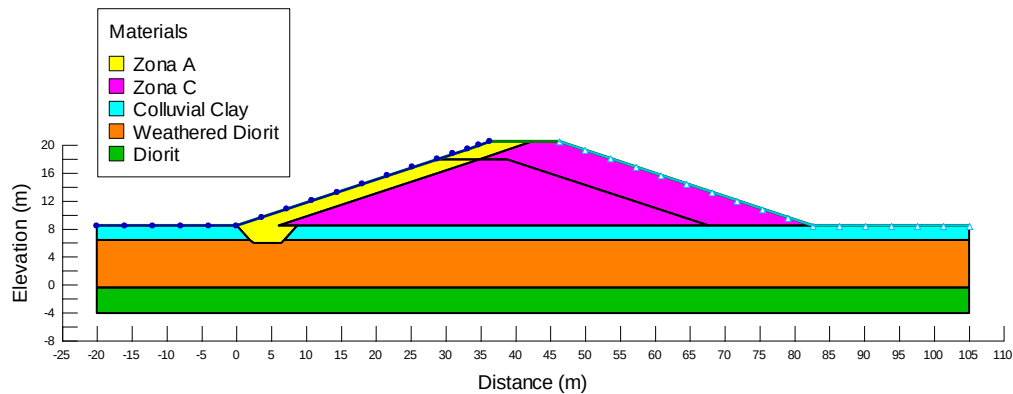
Daerah bendungan secara umum tertutupi formasi Batuamper (Tomb), seperti terlihat pada Gambar 3. yaitu: breksi gunung api, *tuff*, batupasir, batupasir tufan, lava andesit, dan sisipan batu gamping, telah mengalami perubahan kuat, merupakan endapan turbidit, dan aliran gravitasi(Rohaendi et al., 2023).

Litologi penyusun di daerah Bendungan No.1 terdiri dari 3 jenis litologi, yaitu:

1. Breksi vulkanik yaitu batuan endapan atau sedimen yang terbentuk akibat aktivitas vulkanisme atau merupakan batuan piroklastik. Batuan piroklastik adalah batuan yang terbentuk oleh proses litifikasi bahan-bahan lepas yang dilemparkan dari pusat vulkanik secara erupsi yang bersifat eksplosif yang kemudian terangkut melalui media gas/angin.



Gambar 3. Potongan Memanjang Bendungan Tujuh Bukit 1



Gambar 4. Model Bendungan Tujuh Bukit 1

Kemudian selanjutnya terendapkan diatas tanah yang kering atau dalam tubuh air. Untuk vulkanisme bawah laut, bahan piroklastik tersebut langsung terendapkan melalui tubuh air ke dalam dasar laut (Prabowo et al., 2021).

2. *Tuff*
3. *Colluvium*.

Gambar 4. Menjelaskan tentang model dari bendungan tersebut dimana material zona A merupakan material yang berfungsi untuk menahan air. Untuk material zona C merupakan material yang berpengaruh terhadap stabilitas bendungan.

Parameter geoteknik material zona A didapatkan dari data awal perencanaan. Untuk parameter material zona C karena berpengaruh besar terhadap stabilitas dilakukan pengambilan sampel dan dilakukan pengujian laboratorium.

III.3 Koefisien Gempa

Dalam penentuan percepatan puncak yang digunakan untuk perhitungan, dilakukan penentuan kelas risiko terlebih dahulu (Annisa et al., 2021). Adapun poin-poin yang digunakan dalam penentuan kelas risiko terlihat pada Tabel III.2 mengacu kepada Pedoman Pd T-14-2004-A tentang analisis stabilitas bendungan tipe urugan akibat beban gempa (Departemen Pekerjaan Umum, 2005).

Tabel 2 Kelas Risiko Bendungan Tujuh Bukit 1

No	Pengaruh Risiko	Ukuran	Faktor Risiko	Bobot
1	Kapasitas (m ³)	844 000	FR _K	2
2	Tinggi (m)	19.5	FR _T	2
3	Kebutuhan Evakuasi (orang)	100	FR _E	4
4	Tingkat Kerusakan Hilir	Moderat	FR _H	4
FR _{total}				12
Klasifikasi				II (Moderat)

Kelas resiko Bendungan Tujuh Bukit termasuk Kelas II (Moderat), maka:

1. Analisis dengan persyaratan tanpa kerusakan pada periode ulang $T = 100$ tahun dengan $F_{kmin} \geq 1,20$ sesuai dengan kriteria yang berlaku. Nilai PGA berdasarkan buku Peta Gempa Tahun 2022 sebesar 0,19 g.
2. Persyaratan diperkenankan ada kerusakan tanpa keruntuhan pada periode ulang $T = 3000$ tahun dengan $FK \leq 1$, jika tidak dipenuhi harus dilakukan analisis dinamik untuk menghitung alihan tetap (alihan tetap harus kurang dari 50% tinggi jagaan). Dalam Buku Peta Gempa Tahun 2022 tidak terdapat nilai PGA untuk kondisi 3000 tahun. Maka digunakan periode ulang 5000 tahun namun dengan *range* terendah. Nilai PGA berdasarkan buku Peta Gempa Tahun 2022 sebesar 0,52 g.

III.4 Analisis Stabilitas Lereng

Pemodelan evaluasi rekapitulasi parameter material Bendungan Tujuh Bukit 1 yang digunakan dalam analisis dapat dilihat pada tabel sebagai berikut.

Tabel 3. Ringkasan Parameter Material Bendungan Tujuh Bukit Model Studi

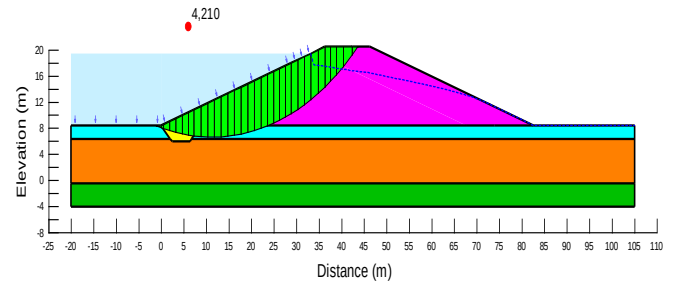
Zona	Material	γ_{wet} (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	k m/s
A	Zona A	17,35	15,00	23,00	1,00E-08
C	Zona C	17,35	31,00	26,79	1,60E-07
Foundation	Colluvial Clay	18,00	15,00	23,00	1,00E-08
	Weathered Diorit	19,00	30,00	25,00	3,00E-08
	Diorit	20,00	50,00	26,00	1,00E-07

Untuk mendekati kondisi aktual. Hasil monitoring instrumentasi piezometer yang akan digunakan dalam analisis stabilitas pada Bendungan Tujuh Bukit dapat dilihat pada tabel sebagai berikut.

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Monitoring Instrumentasi Piezometer pada Bendungan Tujuh Bukit 1

No	Tanggal	Muka Air Waduk (m)	Piezometer	Elevasi Tekanan Air Pori (m)
1	24 Februari 2021	19,45	PZ2-02	19,25
2	24 Februari 2021	19,45	PZ1-01	16,56

Hasil analisis stabilitas lereng kondisi statik, gempa OBE, dan gempa MDE didapatkan memenuhi persyaratan minimum. Gambar 5. merupakan hasil dari perhitungan ketiga kondisi tersebut.



Gambar 5. Bidang longsor analisis stabilitas lereng statik hulu Steady State

Tabel 5. Hasil Analisis Stabilitas Bendungan 1 Kondisi Steady State Mekanisme Pembebanan Statik

Sisi	Kondisi	Muka Air (m)	SF	Syarat
Hulu	Steady State	19,45	4,210	SF > 1,50
	Rapid Drawdown	19,45	2,262	SF > 1,30
Hilir	Steady State	19,45	1,959	SF > 1,50
	Rapid Drawdown	19,45	1,969	SF > 1,30

Dari Tabel 5. di atas terlihat bahwa faktor keamanan dari berbagai kondisi berada di atas ambang batas yang disyaratkan dengan kondisi *steady state* pada sisi hulu berada pada faktor keamanan tertinggi.

Tabel 6. Hasil analisis stabilitas endungan 1 kondisi Steady State mekanisme pembebanan pseudostatik Operated Based Earthquake (OBE)

Sisi	Kondisi	Y/h	K	SF	Syarat	Cek
Hulu	Steady state	0,25	0,27 2	3,308	SF > 1,20	OK
		0,50	0,22 7	2,754	SF > 1,20	OK
		0,75	0,20 7	2,406	SF > 1,20	OK
		1,00	0,18 7	1,749	SF > 1,20	OK
Hilir	Steady State	0,25	0,27 2	3,134	SF > 1,20	OK
		0,50	0,22 7	2,225	SF > 1,20	OK
		0,75	0,20 7	1,753	SF > 1,20	OK
		1,00	0,18 7	1,239	SF > 1,20	OK

Tabel 6. di atas memperlihatkan bahwa dari dua sisi hulu dan hilir, keduanya mempunyai faktor keamanan di atas dari yang disyaratkan, akan tetapi pada sisi hilir faktor keamanan relatif lebih rendah dibandingkan dengan sisi hulu yang rata-rata mempunyai faktor keamanan dua kali lipat dari yang disyaratkan.

Tabel 7 Hasil analisis stabilitas Bendungan 1 kondisi Steady State mekanisme pembebanan pseudostatik Maximum Design Earthquake (MDE)

Sisi	Kondisi	Y/h	K	SF	Syarat	Cek
Hulu	Steady State	0,25	0,5 83	1,9 71	SF > 1,00	OK
		0,50	0,4 86	1,6 82	SF > 1,00	OK
		0,75	0,4 43	1,4 90	SF > 1,00	OK
		1,00	0,4 00	1,1 03	SF > 1,00	OK
Hilir	Steady State	0,25	0,5 83	1,9 17	SF > 1,00	OK
		0,50	0,4 86	1,4 84	SF > 1,00	OK
		0,75	0,4 43	1,2 19	SF > 1,00	OK
		1,00	0,4 00	0,8 89	SF > 1,00	SF < 1,00 maka Cek Deformasi

Tabel 7. di atas memperlihatkan mekanisme pembebanan pseudostatik MDE, di mana untuk sisi hulu faktor keamanan berada di atas yang disyaratkan. Akan tetapi sisi hilir perlu

pengecekan deformasi dikarenakan satu nilai faktor keamanan berada di bawah yg disyaratkan.

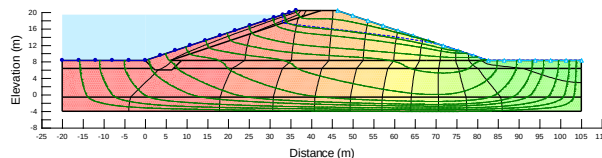
Tabel 8 Hasil Analisis Deformasi Bendungan 1 Berdasarkan Metode Makdisi-Seed

Sisi	Y/h	Deformasi masi (cm)	Tinggi Jagaan (cm)	Syarat	Cek
Hulu	0,25	0	400	Deformasi < 0,5 Tinggi Jagaan	OK
	0,50	0	400	Deformasi < 0,5 Tinggi Jagaan	OK
	0,75	0	400	Deformasi < 0,5 Tinggi Jagaan	OK
	1,00	0	400	Deformasi < 0,5 Tinggi Jagaan	OK
Hilir	0,25	0	400	Deformasi < 0,5 Tinggi Jagaan	OK
	0,50	0	400	Deformasi < 0,5 Tinggi Jagaan	OK
	0,75	0	400	Deformasi < 0,5 Tinggi Jagaan	OK
	1,00	5	400	Deformasi < 0,5 Tinggi Jagaan	OK

Dari hasil pengecekan deformasi seperti yang terlihat pada Tabel 8. di atas, baik sisi hilir ataupun hilir memperlihatkan nilai deformasi lebih kecil dari 0.5 tinggi jagaan sehingga menghasilkan penilaian OK.

III.5 Analisis Keamanan Rembesan

Rembesan melalui tubuh bendungan, fondasi, tumpuan, dan tepian/bukit sekeliling waduk harus terkendali, sehingga tidak boleh terjadi gaya angkat (*uplift*) yang berlebihan, ketidakstabilan, longsoran, aliran buluh, terhanyutnya material karena pelarutan, atau erosi internal/material terbawa aliran rembesan melalui rekahan, kekar, dan rongga (Peraturan Pemerintah No. 37 tentang Bendungan, 2010). Analisis rembesan Bendungan 1 terdiri dari analisis terhadap *uplift* dan analisis terhadap *piping* dan *boiling*.

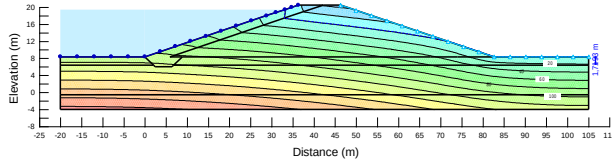


Gambar 6. Flow Net Bendungan 1

Gambar 6. merupakan hasil pemodelan *flow net* dari Bendungan I.

Uplift

Hasil analisis *uplift* pada Bendungan 1 dapat dilihat pada Gambar 7. sebagai berikut.



Gambar 7. Kontur Tekanan Air Pori Bendungan 1 Kondisi Steady State Muka Air Waduk

Berdasarkan hasil analisis *uplift* Bendungan 1 diperoleh nilai *safety factor* terhadap *uplift* yang dapat ditentukan sebagai berikut.

$$SF = \frac{\gamma_n \times t}{\gamma_w \times h} \quad (1)$$

di mana :

SF : faktor keamanan

γ_n : berat volume material fondasi

γ_w : berat volume air

t : tebal lapisan *overburden*

h : Tinggi tekanan piezometric

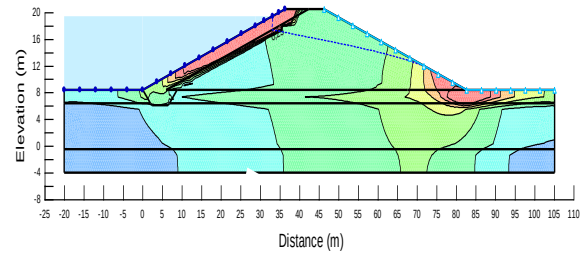
$$SF = \frac{18 \times 1,7193}{20}$$

$$SF = 1,547$$

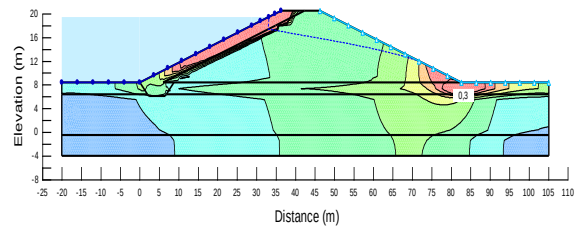
Berdasarkan hasil analisis *uplift* Bendungan 1 diperoleh nilai *safety factor* terhadap *uplift* sebesar 1,547. Nilai *safety factor* terhadap *uplift* tersebut memenuhi persyaratan *safety factor* terhadap *uplift* untuk kondisi bendungan eksisting, dimana nilai *safety factor* terhadap *uplift* harus bernilai minimal 1,5 ($SF > 1,5$).

Piping dan Boiling

Hasil analisis *piping* dan *boiling* pada Bendungan 1 dapat dilihat pada Gambar dan Gambar sebagai berikut. Gradien hidrolik menggambarkan perubahan tekanan air (*head*) per satuan panjang dalam media tanah di sekitar bendungan, memperlihatkan kerapatannya pada kaki bendungan. Penilaian dilakukan untuk melihat perbandingan dengan nilai gradien kritis untuk evaluasi keamanannya.



Gambar 8. Kontur Gradient Hydraulic XY Zona A Bendungan 1 Kondisi Steady State Muka Air Waduk



Gambar 9. Kontur Gradient Hydraulic XY Kaki Hilir Bendungan 1 Kondisi Steady State Muka Air Waduk

Berdasarkan hasil analisis *piping* dan *boiling* Bendungan 1 diperoleh nilai *safety factor* terhadap *piping* dan *boiling* pada yang dapat ditentukan sebagai berikut.

$$i_c = \frac{Gs - 1}{1 + e} \quad (2)$$

di mana :

i_c : gradien kaluaran kritis

G_s : *spesific gravity*

e : angka pori

$$i_c = \frac{2,586 - 1}{1 + 0,5} = 1,057$$

$$SF = \frac{i_c}{i_e} \quad (3)$$

di mana :

SF : faktor keamanan

i_c : gradien kaluaran kritis

i_e : gradien keluaran dari hasil analisis rembesan atau pembacaan isometer

$$SF = \frac{1,057}{0,25}$$

$$SF = 4,23$$

Berdasarkan hasil analisis *piping* dan *boiling* Bendungan 1 diperoleh nilai *safety factor* terhadap

pipng dan *boiling* pada kaki hilir bendungan yang dapat ditentukan sebagai berikut.

$$i_c = \frac{2,635 - 1}{1 + 0,777} = 0,92$$

$$SF = \frac{0,92}{0,3}$$

$$SF = 3,07$$

Berdasarkan hasil analisis *pipng* dan *boiling* Bendungan 1 diperoleh nilai *safety factor* terhadap *pipng* dan *boiling* sebesar 4,23 dan 3,07. Nilai *safety factor* terhadap *pipng* dan *boiling* tersebut memenuhi persyaratan *safety factor* terhadap *pipng* dan *boiling* untuk kondisi bendungan eksisting, dimana nilai *safety factor* terhadap *pipng* dan *boiling* harus bernilai minimal 3 ($SF > 3$).

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan studi yang telah dilakukan untuk analisis stabilitas Bendungan 1 Tujuh Bukit adalah sebagai berikut: karakteristik geoteknik Bendungan 1 Tujuh Bukit terbagi menjadi dua bagian. Bagian tersebut adalah tubuh bendungan dan pondasi. Tubuh bendungan terbagi menjadi dua zona, yaitu Zona A yang berfungsi sebagai lapisan zona kedap dengan menggunakan lapisan yang berbutir halus kemudian material Zona C yang berfungsi untuk menahan stabilitas lereng. Untuk pondasi terbagi menjadi 3 lapisan dengan lapisan pertama adalah lapisan *colluvium clay*, lapisan kedua adalah lapisan *diorite* yang mengalami pelapukan, dan ketiga adalah lapisan *diorite* yang *fresh*. Karakteristik ini termuat dalam hasil nilai-nilai parameter geoteknik yang dikumpulkan dan dibutuhkan dalam analisis model stabilitas lereng serta keamanan rembesan. Hasil perhitungan analisis stabilitas lereng Bendungan 1 kondisi statik, gempa OBE, dan gempa MDE memenuhi persyaratan minimum. Hasil perhitungan analisis keamanan rembesan *uplift* dan erosi buluh memenuhi persyaratan minimum. Berdasarkan analisis didapatkan bahwa desain bendungan masih memenuhi kriteria angka minimum keamanan, sehingga tidak diperlakukan penambahan rekomendasi desain

REFERENSI

- Agustian, Y. (2021). LIKUEFAKSI. *Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi Terapan*, 8(1), 209–215. <https://doi.org/10.33197/jitter.vol8.iss1.2021.749>
- Akhlaghi, T., & Nikkar, A. (2014). Evaluation of the pseudostatic analyses of earth dams using FE simulation and observed earthquake-induced deformations: Case studies of upper San Fernando and Kitayama dams. *The Scientific World Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/585462>
- Annisa, R., Sriyana, I., & Sangkawati, S. (2021). APLIKASI METODE MODIFIKASI ICOLD UNTUK PENILAIAN KELAS RESIKO BENDUNGAN TAPIN. *Wahana Teknik Sipil: Jurnal Pengembangan Teknik Sipil*, 26(2), 101. <https://doi.org/10.32497/wahanats.v26i2.3125>
- Departemen Pekerjaan Umum. (2005). Pedoman Rekayasa Penanganan Keruntuhan Lereng pada Tanah Residual dan Batuan Pd T-09-2005-B. *Departemen Pekerjaan Umum*, 98. <https://dewey.petra.ac.id/catalog/digital/detail?i=20717>
- Durga Naga Laxmi Devi, D., & Anbalagan, R. (2017). Study on Slope Stability of Earthen Dams by using GEOSTUDIO Software. *Anbalagan .R, International Journal of Advance Research*, 3(6), 408–414. www.IJARIIT.com
- Matsumoto, N. (2008). The Recent Earthquakes and Dam Safety in Japan. *Concrete*, 2(1), 549–554.
- Melo, C., & Sharma, S. (2004). Seismic Coefficients for Pseudostatic Slope Analysis. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, 369, 15.
- Nalgire, T., P. P, D., A.A, M., & P.D, H. (2020). Slope Stability Analysis by GeoSlope. *HELIX*, 10(1), 71–75. <https://doi.org/10.29042/2020-10-1-71-75>
- Peraturan Pemerintah No. 37 tentang Bendungan. (2010). PERATURAN PEMERINTAH REPUBLIK INDONESIA NOMOR 37 TAHUN 2010 TENTANG BENDUNGAN. *International Journal of Development and Management Review*, 5(1), 212–224. <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/245180/245180.pdf%0Ahttps://hdl.handle.net/20.500.12380/245180%0Ahttps://dx.doi.org/10.>

1016/j.jsames.2011.03.003%0Ahttps://doi.org/1
0.1016/j.gr.2017.08.001%0Ahttp://dx.doi.org/1
0.1016/j.precamres.2014.12

Prabowo, A., Permanadewi, S., & Samodra, H. (2021). Analisis Batuan Gunungapi di Daerah Banyuwangi dan Sekitarnya, Provinsi Jawa Timur Berdasarkan Aspek Geokimia. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, 22(4), 197–207.

<https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v22i4.658>

Rohaendi, N., Setiawan, I. F., Budiyo, A., Harmoko, A. A., & Wahyudi, W. (2023). GEOLOGI DAN MODEL KOLABORASI PENGEMBANGAN GEOPARK IJEN, DI KABUPATEN BANYUWANGI. *JURNAL GEOMINERBA (JURNAL GEOLOGI, MINERAL DAN BATUBARA)*, 8(2), 166–179.

<https://doi.org/10.58522/ppsdm22.v8i2.145>

Setiawan, N. (2023). Pengertian Metode Penelitian dan Jenis-jenis Metode Penelitian. In *Ranah Research*. <https://ranahresearch.com/metode-penelitian-dan-jenis-metode-penelitian>

Stamatovska, S. G. (2010). Seismic Design Parameters for Large Dams-ICOLD METHOD. *14th European Conference on Earthquake Engineering*, 14(August 2010), 688. <https://www.researchgate.net/publication/307399999>

Agustian, Y., Arfah, MN., Ashshiddiq, RHB. (2024). Evaluasi Keruntuhan Dinding Galian Pile Cap dan Alternatif Penanganannya. *Syntax Litarate, Jurnal Ilmiah Indonesia*, 9(6), 3397–3407.

Yu, R., Huang, Z., & Yang, Z. (2022). SLOPE REINFORCEMENT DESIGN BASED ON GEOSTUDIO AND FLAC3D. *Mining Science*, 29, 141–163.

<https://doi.org/10.37190/msc222909>