

ANALISIS STABILITAS BENDUNGAN LIMBAH TAMBANG PT. ANEKA TAMBANG UBPE PONGKOR

Muhammad Hasan Wicaksono ¹, Feril Hariati ², Adi Ria Wardana ³, Fadhila Muhammad Libasut Taqwa ⁴

^{1*, 2, 3, 4} Program Studi Teknik Sipil, Universitas Ibn Khaldun Bogor, Jl. Sholeh Iskandar KM 2,
Kd. Badak, Tanah Sareal Kota Bogor

e-mail: mhasan@uika-bogor.ac.id^{1*}; feril.hariati@uika-bogor.ac.id²; adi.wardana536@gmail.com³;
fadhila.muhammad@uika-bogor.ac.id⁴

ABSTRAK

PT. Antam, yang terletak di Pongkor, Kab. Bogor memiliki bendungan limbah tambang tipe urugan zona inti vertikal/ tegak. Bendungan ini digunakan untuk menampung limbah hasil pengolahan biji emas, yang sebagian besar berbentuk cair kategori Bahan Beracun Berbahaya (B3). Fasilitas bendungan limbah tambang (*tailing*) berupa kolam permukaan besar yang terdiri atas batuan yang telah hancur, air, dan bahan kimia pengolahan, memunculkan beberapa risiko paling umum dan paling besar bagi pekerja, masyarakat, dan lingkungan hidup di sekitar lokasi tambang. Fasilitas semacam ini kemungkinan besar sangat rentan terhadap terjadinya rembesan, yang dapat menyebabkan kontaminasi air tanah dan air permukaan. Oleh karena itu PT. Antam berencana untuk menambahkan geomembran pada tubuh bendung sebagai alat untuk mencegah rembesan limbah cair ke luar bendungan. Penambahan geomembran akan mempengaruhi stabilitas bendungan. Penulisan ini menganalisis stabilitas bendungan terhadap *sliding*, gempa dan rembesan dalam kondisi eksisting dan sesudah ditambah geomembrane, serta penambahan tinggi bendungan yang diperlukan, sebagai dampak dari semakin besarnya produksi emas PT. Antam. Hasil analisis nilai Faktor Keamanan (FK) tanpa penambahan geomembrane dan dengan penambahan geomembrane terhadap guling tidak menunjukkan perbedaan nilai FK yang signifikan. Sedangkan hasil analisis terhadap rembesan menunjukkan perbedaan garis preatik yang cukup signifikan yang berdampak pada stabilitas bendungan.

Kata Kunci: Bendungan Urugan, Tailing, Rembesan, Geomembran, Analisis Stabilitas Bendung

1. PENDAHULUAN

Bendungan *tailing* (*tailing dam*) adalah bendungan tanah yang berfungsi untuk menampung limbah dari proses penambangan yang berupa lumpur, cairan (*tail water*), atau bubur partikel halus yang dihasilkan setelah bijih dipisahkan dari kotorannya (*tailing*). Seiring dengan peningkatan produksi dan ketersediaan teknologi untuk mengolah bijih dengan kadar lebih rendah serta kondisi perekonomian yang menunjang, jumlah *tailing* yang dihasilkan oleh kegiatan pertambangan di Indonesia semakin meningkat dan mencapai 150 juta ton pada tahun 2018. Jumlah ini diperkirakan akan semakin meningkat di tahun-tahun mendatang seiring peningkatan kapasitas produksi dan mulai beroperasinya beberapa tambang baru. Sehingga, penyimpanan *tailing* secara aman baik pada saat operasi produksi dan pada tahap pascatambang merupakan unsur utama dalam kegiatan pertambangan yang berkelanjutan (Anbiyak dkk., 2020). Kegiatan pasca tambang, termasuk untuk bendungan *tailing* merupakan aspek penting yang sudah harus dikaji pada tahap awal kegiatan pertambangan, bahkan sebelum kegiatan operasi produksi dimulai. Secara umum, tujuan utama pasca tambang bendungan *tailing* adalah untuk menghasilkan bendungan *tailing* yang aman dan stabil dalam jangka panjang serta perlindungan terhadap aspek lingkungan, baik air permukaan, air tanah, maupun udara (Adams, Hall, & Brouwer, 2019).

Tambang emas Pongkor, yang dikelola oleh PT Aneka Tambang Tbk. (PT. Antam) Unit Bisnis Pertambangan Emas (UBPE) Pongkor memiliki *Tailing Storage Facilities* (TSF) berupa bendungan yang terletak di Sorongan, Desa Bantar Karet, Kecamatan Nanggung, Kabupaten Bogor. Bendungan merupakan bendung tipe urugan dengan inti tegak dengan panjang puncak bendungan 390 m, lebar puncak bendungan 10 m, tinggi dasar bendungan 58 m dari dasar pondasi. Tipe pelimpah ambang bebas dan melengkung (*ogee*), lebar pelimpah 29 m, elevasi mercu 516,5 m, dengan kapasitas bendungan 1.918.000 m³. Untuk memenuhi kriteria keamanan dan stabilitas, maka UBPE merencanakan penambahan geomembran pada bendungan. Oleh karena, perlu dilakukan analisis dampak dari penambahan geomembran terhadap stabilitas bendung, terhadap beban statik dan gempa.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini diawali dengan pengumpulan data yang diperlukan untuk data analisis stabilitas tubuh bendung. Pengumpulan data dilakukan dengan metode survei dan studi literatur. Data sekunder diperoleh dari konsultan yang bersangkutan. Selanjutnya metode pengolahan data, data yang telah diperoleh dari Konsultan yang bersangkutan diolah untuk mendapatkan nilai-nilai parameter tanah yang akan di masukan sebagai input untuk analisis dengan metode tabular. Terakhir metode analisis, data dilakukan dengan metode perhitungan menggunakan bantuan program komputer dan software yang digunakan adalah *Geostudio 2024*. (Wicaksono & Mukhtadir, 2024; Wantalantie dkk, 2024).

Deskripsi Lokasi Penelitian

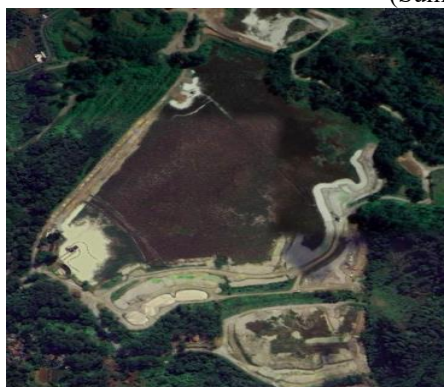
Spesifikasi umum bendungan diperlihatkan pada keterangan di bawah ini

Koordinat geografis	: 6°38'48,91" LS, 106°34'24,68" BT
Lokasi	: Desa Bantar Karet, Kecamatan Nanggung, Kabupaten Bogor
Manfaat	: Penampungan limbah tambang
Pengelola	: PT. Aneka Tambang, tbk. UPBE Pongkor
Type bendungan	: Urugan batu, inti tegak
Panjang puncak	: 390,0 m
Tinggi bendungan	: 58,0 m (dasar pondasi)
Elevasi puncak	: +518,00 (eksisting), +521,00 (rencana peninggian)
Lebar puncak	: 10,0 m
Kemiringan lereng	: U/S = 1:2; D/D = 1:2
Type pelimpah	: Ambang bebas dan melengkung (<i>ogee</i>)
Saluran pelimpah	: Sal. Terbuka, L = 145 m, B = 6,0 m
Lebar pelimpah	: 29,0 m
Elevasi mercu	: +515,5 m
Kapasitas waduk	: 1.918.000 m ³

Bendungan limbah tambang PT. Antam Pongkor berada pada ketinggian 517 m di dasar sungai Cikaniki. Untuk lokasi penelitian dapat dilihat pada gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1 Lokasi penelitian
(Sumber: Google Earth, 2017)



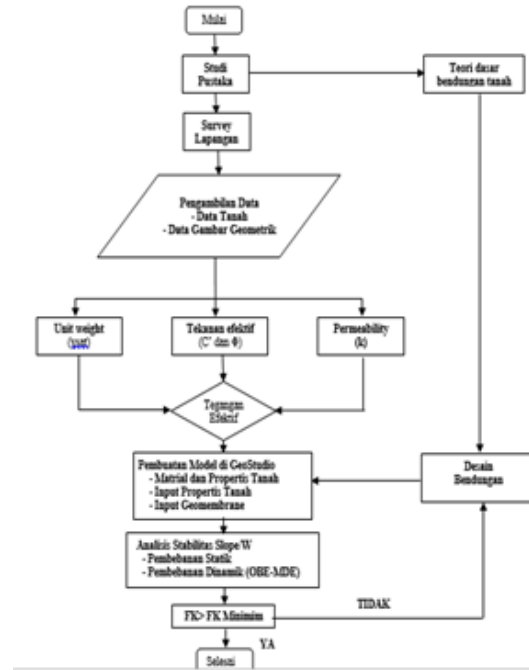
Gambar 2 Lokasi Bendungan Limbah Tambang
(Sumber: Google Earth, 2024)



Gambar 3 Dokumentasi lokasi penelitian
(Sumber: Dok, Pribadi, 2024)

Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian diperlihatkan pada gambar 4 di bawah ini



Gambar 4 Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

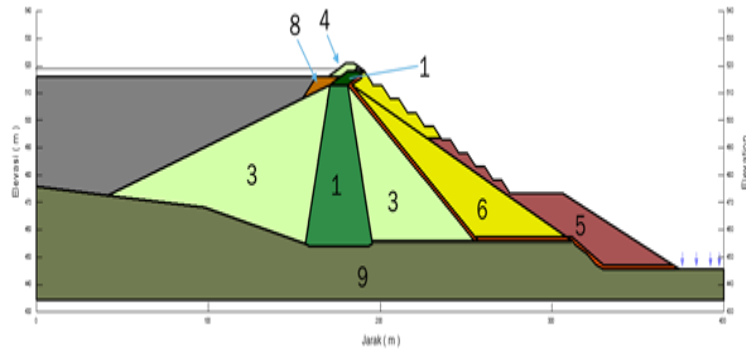
Parameter desain

Penentuan parameter desain untuk Analisis Stabilitas Bendungan Indikator capaian yang ditargetkan pada tahap ini yaitu mengetahui masing-masing nilai K (m/sec), γ_{sat} (KN/m³), kohesi (c) (Kpa), Φ ϕ (°) (Taqwa, dkk., 2017), dan material model dari jenis material bendungan Limbah Tambang PT. Antam diperlihatkan pada tabel 1.

Tabel 1 Parameter tubuh bendungan

Zona	Material	Unit weight	Tekanan Efektif (<i>long term</i>)		Permeabilitas	Sumber
		γ_{sat} (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ' (°)	k (cm/detik)	
1	Inti kedap, peninggian tahap I	16,5	28	16,5	4,68E-7	peninggian tahap I, 2014
2	Inti kedap, rencana peninggian	17,0	13	24	2,10E-6	uji lab, 2023
3	Random, tanah eksisting	17,0	11,5	29	7,76E-5	peninggian tahap I, 2014
4	Random tanah, rencana peninggian	17,0	21	27	8,30E-5	uji lab, 2023
5	Random batu, peninggian tahap I	20,0	5	40	1,00E-4	peninggian tahap I, 2014
6	<i>Rock fill</i> , eksisting	20,0	0	45	1,00E-3	peninggian tahap I, 2014
7	<i>Rock fill</i> , peninggian tahap I	20,0	0	40	1,00E-3	peninggian tahap I, 2014
8	Waste	19,0	37	40	9,59E-5	uji lab, 2023
9	Pondasi (<i>sub-grade, Tuff-lapili</i>)	20,0	0	40	1,00E-8	peninggian tahap I, 2014

Sumber: Laporan desain peninggian 2014 dan data lab 2023



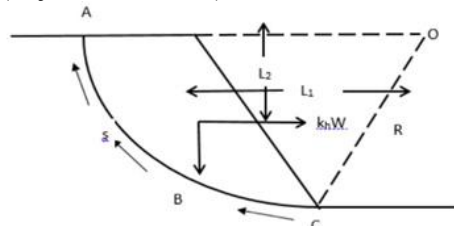
Gambar 5 Zonasi tubuh bendungan

Pembebanan dinamis metode pseudostatis

Analisa pseudostatis merupakan analisa perhitungan beban gempa pada periode tertentu tanpa adanya kerusakan pada badan bendungan. Analisis gempa dengan metode pseudostatis ini mengacu pada Buku Pedoman Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Sumber Daya Air sesuai dengan Keputusan Direktur Jenderal Sumber Daya Air tahun 2008.

Analisis pseudostatik dilakukan dengan mempertimbangkan aspek getaran, misalnya gempa bumi. Sebelumnya Terzaghi (1950) telah memperkenalkan aplikasi dari metode pseudostatik ini. Sedangkan analisis static dilakukan dengan tanpa mempertimbangkan aspek gangguan lainnya. Karena itu peran analisis pseudostatic dibutuhkan dengan berbagai pertimbangan. (Firmada, 2018; Hasibuan, 2023; Lumentah dkk., 2021)

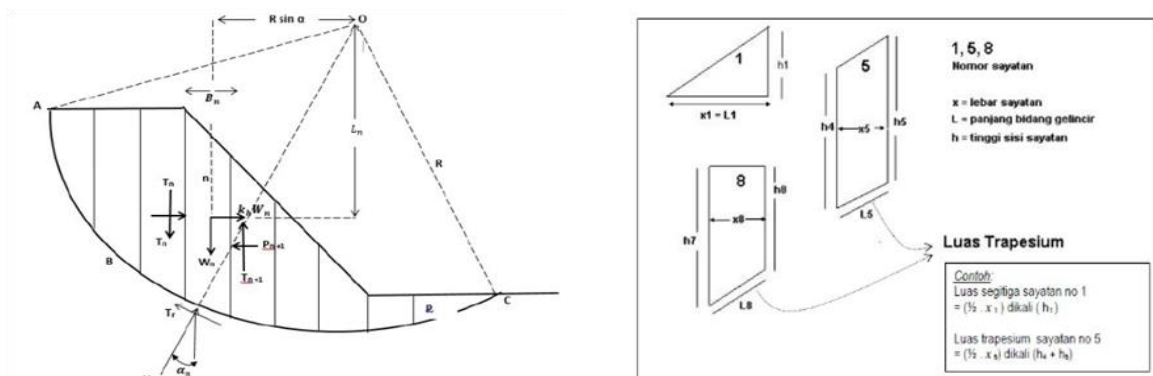
Dalam kasus getaran yang diakibatkan oleh gempa akan mempengaruhi tekanan air pori dan tegangan efektif dalam tanah. Perpindahan tanah selama gempa bumi menyebabkan momen inersia yang besar pada lereng. Pada saat lereng mengalami pengaruh gempa dapat diasumsikan bahwa tanah tersebut akan mengalami sedikit penurunan pada kekuatan lereng karena beban siklis. Sampai pertengahan tahun 1960, sebagian besar dari lereng dianalisis dengan menggunakan metode pseudostatik. (Rojudin dkk., 2020)



Gambar 6 Skema metode Pseudostatis

Berdasarkan gambar di atas, ABC adalah lingkaran dengan pusat pada titik O, mengingat panjang lereng gaya yang bekerja pada permukaan adalah sebagai berikut: A Sebuah berat *wedge*, W ; b. Inersia berlaku pada *wedge*, $k_h.W$ yang merupakan efek gempa bumi. Faktor k_h adalah koefisien rata-rata percepatan horizontal; c. Menolak gaya persatuan luas (s) yang merupakan kekuatan geser tanah, bertindak sepanjang kegagalan percobaan ABC, faktor keamanan sehubungan dengan kekuatan F_s .

Faktor aman didefinisikan dengan memperhatikan tegangan geser rata-rata sepanjang bidang longsor yang potensial dan kuat geser tanah rata-rata sepanjang permukaan longsoran. Jadi kuat geser tanah mungkin terlampaui di titik-titik tertentu pada bidang longsornya, padahal faktor aman hasil hitungan lebih besar 1. Lereng dianggap stabil jika faktor amannya memenuhi syarat yang ditentukan, yaitu: 1. $F = 1.5$ tanpa gempa; 2. $F = 1.2$ ada gempa. (Chayati dkk., 2023)



Gambar 7 Contoh Perhitungan Pseudostatis

Dalam melakukan analisis kestabilan lereng dengan metode pseudostatic diperlukan suatu koefisien pseudostatic atau koefisien gempa horizontal (K_h).

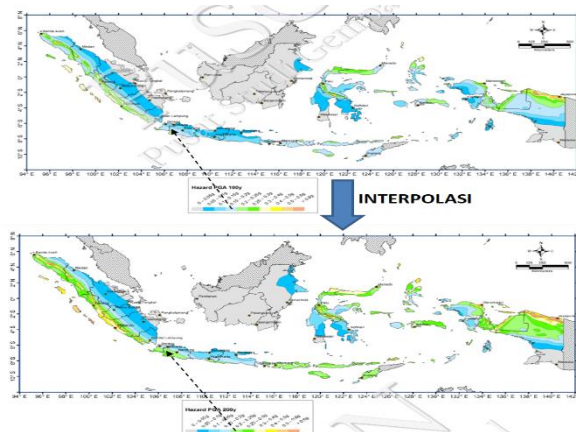
$$FS = \frac{\sum_{n=1}^p (c \cdot B_n \sec \alpha + W_n \cos \alpha_n \tan \phi)}{\sum_{n=1}^p (W_n \sin \alpha_n + k_h W_n \left(\frac{L_n}{R}\right))} \quad (1)$$

Dimana: K_h = koefisien gempa horizontal; W = luas tiap irisan; c = kohesi; R = jari-jari longsor; h = tinggi rata-rata irisan; b = lebar irisan; x = jarak horizontal dari pusat massa irisan terhadap pusat momen; α = sudut kemiringan.

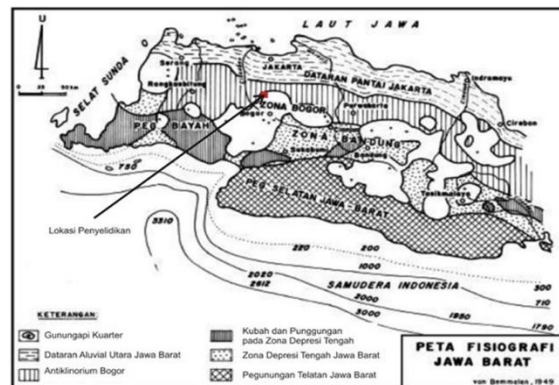
Koefisien gempa horizontal ini akan mengontrol gaya pseudostatik yang bekerja pada tanah. Berdasarkan analisis Newmark dalam Hoek and Bray (1981), dengan percepatan hasil K_h sama dengan 50% dari *Peak Ground Acceleration* (PGA) (yaitu $K_h = 0,5 \cdot a_{max}/g$) menunjukkan bahwa perpindahan seismik akan kurang dari 1 m (Hynes dan Franklin, 1984). Berdasarkan hal tersebut maka Departemen Pertambangan dan Geologi California (CDMG, 1997) menyatakan nilai koefisien seismic (K_h) diperoleh dengan persamaan berikut:

$$k_h = 0,5 \frac{a_d}{g} \quad (2)$$

Dimana: K_h = koefisien gempa horizontal; a_d = percepatan gempa terkoreksi (gal); g = gal



Gambar 8. Peta Zona Gempa Indonesia Tahun 2017 kala ulang 145



Gambar 9. Peta Zona Gempa Pulau Jawa, Indonesia

Langkah perhitungan cara Makdisi-Seed diuraikan dalam analisa yang didasarkan pada kondisi MDE yaitu memperhitungkan beban gempa dengan persyaratan diperbolehkan ada tingkat kerusakan tanpa ada keruntuhan dengan periode gempa yang lebih panjang.

Analisis gempa dengan cara Makdisi-Seed ini pun mengacu pada Buku Pedoman Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Sumber Daya Air sesuai dengan Keputusan Direktur Jenderal Sumber Daya Air Tahun 2008.

Peninjauan dilakukan pada nilai $Y = 0.25.H, 0.5.H, 0.75.H$ dan H (H adalah tinggi dam). Nilai koefisien gempa mengikuti peraturan sebagai berikut:

- $0.0 < Y/H < 0.4$, nilai koefisien gempa adalah: $K = K_0 \times \{2.5 - 1.85.(Y/H)\}$
- $0.4 < Y/H < 1.0$, nilai koefisien gempa adalah: $K = K_0 \times \{2.0 - 0.60.(Y/H)\}$

Tahapan pelaksanaan analisa stabilitas untuk pembebanan dinamis dengan cara Makdisi-Seed atau analisa alihan tetap sebagai lanjutan dari analisa stabilitas pembebanan dinamis metode pseudeostatis dengan nilai faktor keamanan ($FK < 1$). Gaya statik seismik vertikal dan horizontal dipakai untuk mensimulasikan gaya inersia yang merupakan percepatan gempa. Gaya seismik yang diperhitungkan hanya arah horizontal k_h , sedangkan arah vertikal $k_v = 0$, dimana $k_h W$ bekerja pada lereng serta berat W tanah akan berpotensi terjadinya longsor (*sliding mass*). Analisis gempa dilakukan

dengan menggunakan perhitungan kelas resiko yang dikorelasikan terhadap periode gempa persyaratan yang diperkenankan. Kelas resiko tergantung pada kapasitas tampung rencana, tinggi bendungan, jumlah evakuasi orang, dan tingkat perkiraan kerusakan.

Tabel 2 Koefisien Gempa

PARAMETER	PETA GEMPA	PARAMETER	PETA GEMPA TAHUN 2017
Periode Ulang, T (tahun)	145-tahun	Periode Ulang, T (tahun)	5000-tahun
a_c (gal), (percepatan gempa dasar)	0.223	a_c (gal), (percepatan gempa dasar)	0.650
v (Faktor koreksi jenis tanah/batuan)	1.00 (Batuan)	v (faktor koreksi jenis tanah/batuan)	1.00 (Batuan)
$a_u = Z * a_c * v$ (gal)	0.223	$a_u = Z * a_c * v$ (gal)	0.650
$K_h = a_u / g$	0.227	$K_h = a_u / g$	0.663
$K_o = \alpha_2 * K_h = 0.50 * K_h$	0.114	$K_o = \alpha_2 * K_h = 0.50 * K_h$	0.332
Utk $Y/H=0.25$; $K=K_o \times (2.5 - 1.85(Y/H)) =$	0.231	Utk $Y/H=0.25$; $K=K_o \times (2.5 - 1.85(Y/H)) =$	0.676
Utk $Y/H=0.50$; $K=K_o \times (2.0 - 0.60(Y/H)) =$	0.193	Utk $Y/H=0.50$; $K=K_o \times (2.0 - 0.60(Y/H)) =$	0.564
Utk $Y/H=0.75$; $K=K_o \times (2.0 - 0.60(Y/H)) =$	0.176	Utk $Y/H=0.75$; $K=K_o \times (2.0 - 0.60(Y/H)) =$	0.514
Utk $Y/H=1.00$; $K=K_o \times (2.0 - 0.60(Y/H)) =$	0.159	Utk $Y/H=1.00$; $K=K_o \times (2.0 - 0.60(Y/H)) =$	0.464

(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Analisis Stabilitas Lereng menggunakan Geo-studio 2024

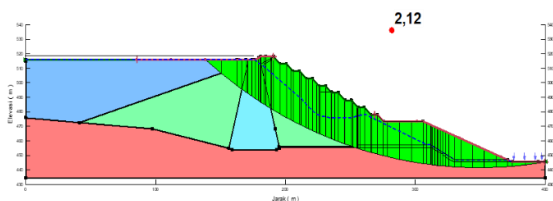
analisis pada stabilitas lereng dapat menggunakan beberapa program komputer yang dapat mempermudah menganalisis stabilitas bendungan limbah tambang PT. Antam Pongkor. Untuk lereng pada bendungan utama (main dam) TSF Pongkor ini dianalisis menggunakan program komputer Geo-Studio 2024.

Analisis pada Geo-Studio2024 fitur SLOPE/W ini yang kita input diantaranya, dimensi bendungan limbah tambang PT.Antam Pongkor, kemudian penentuan jenis material yang digunakan, dan terakhir memasukkan data-data hasil uji laboratorium agar dapat digunakan sebagai parameter dalam menganalisis stabilitas lereng bendungan Limbah tambang PT. Antam Pongkor.

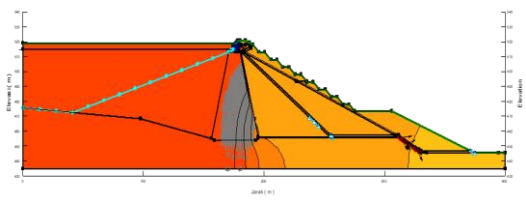
Langkah-langkah yang perlu dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Pastikan Geo-Studio 2024 yang digunakan adalah yang *Full License* agar semua fitur dapat dipakai guna kepentingan menganalisis sebuah lereng.
2. Kemudian memasukkan data material yang terdapat pada bendungan.
3. Setelah memasukkan jenis material kemudian memasukkan data-data lab yang ada diantaranya kepadatan, kohesi, volume dan lain-lain. Caranya bisa memakai menu *Key in Materials*.
4. Setelah semua terinput baik itu dimensi (gambar) bendungan Limbah PT. Antam, jenis material yang digunakan, dan terakhir memasukkan data- data hasil uji laboratorium, maka langkah terakhir adalah menjalankan menggunakan fasilitas “*Solve Analysis*”. Hasil analisis stabilitas lereng menggunakan program *Geo-Studio2024* fitur *SLOPE/W*.
5. Setelah menganalisis stabilitas dengan *SLOPE/W* maka dilanjutkan dengan menganalisis rembesan yaitu dengan fitur *SEEP/W*.

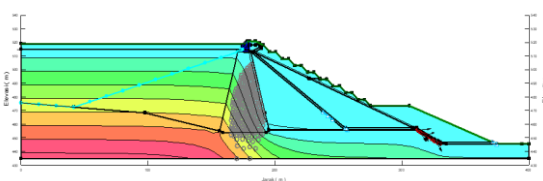
Hasil analisis dengan menggunakan Geo-studio 2024 diperlihatkan pada gambar – gambar di bawah ini.



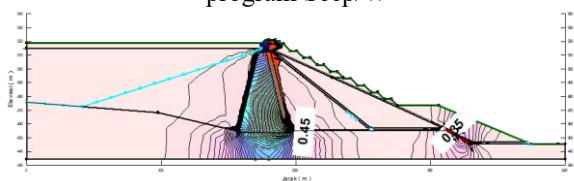
Gambar 10 Analisis *sliding*



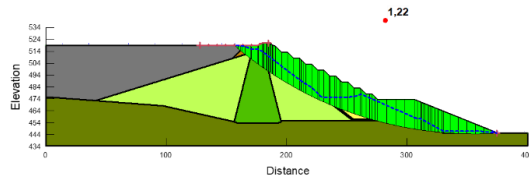
Gambar 11 Grafik kontur total head hasil analisis program *Seep/W*



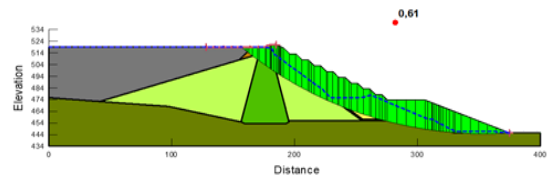
Gambar 12 Grafik pressure head hasil analisis program *Seep/W*



Gambar 13 Grafik gradien exit hasil analisis program *Seep/W*



Gambar 14 Bidang Longsor ke arah *Downstream OBE* (145 Thn) SF = 1.22



Gambar 15 Bidang Longsor ke arah *Downstream MDE* (5000 Thn) SF = 0.61

Karena angka keamanan pada kondisi *MDE* lebih kecil dari 1, maka dilakukan analisa dinamik. Analisa dinamik akan dilakukan dengan metode alihan tetap cara Makdisi-Seed.

Prosedur perhitungan analisis dinamik dengan cara Makdisi-Seed ini secara garis besarnya dapat dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Lakukan studi resiko gempa dalam menentukan parameter gempa untuk memperoleh percepatan gempa desain di permukaan tanah, a_d dan M_s pada periode ulang sesuai dengan kriteria, spektrum percepatan gempa penormalan Sa/a_d dengan redaman D , dan koreksi pengaruh rasio redaman D dengan C_n (semua nilai tersebut dapat diperoleh dari grafik-grafik yang dikeluarkan oleh Seed & Idriss (1970)).
2. Lakukan analisa stabilitas pada $Y/H = 0.25; 0.50; 0.75; \& 1.00$ dengan mengubah-ubah nilai K_h pada bidang longsor kritis dengan data parameter tanah semua dalam kondisi tegangan efektif. Berdasarkan hal tersebut, tentukan nilai k_y (percepatan gempa kritis pada $FK = 1$).
3. Tentukan parameter dinamik material tanah V_{smax} dan G_{max} ; grafik hubungan antara G/G_{max} dan D dengan regangan geser (ϵ) dari pondasi dan tubuh bendungan/dam sesuai dengan prosedur yang dikeluarkan oleh Seed & Idriss (1970).
4. Hitung atau taksir nilai V_{smax} dengan persamaan:
 $\beta_1 = 2.404; \omega_1 = 2.404 V_s/H;$
 $T_1 = 2\pi/\omega_1 = 2.614 H/V_s; Sa_1 = C_n \times a_d \times Sa/a_d$
 $\beta_2 = 5.520; \omega_2 = 5.520 V_s/H;$
 $T_2 = 2\pi/\omega_2 = 1.138.H/V_s; Sa_2 = C_n \times a_d \times Sa/a_d$
 $\beta_3 = 8.654; \omega_3 = 8.654 V_s/H;$
 $T_3 = 2\pi/\omega_3 = 0.726 H/V_s; Sa_3 = C_n \times a_d \times Sa/a_d$
 $(\epsilon_{rata}) e_k = 0.195 \times (H/V_{s2}) \times Sa_1$; kemudian dari grafik hubungan antara G/G_{max} dengan ϵ cari nilai G/G_{max} tersebut pada $(\epsilon_{rata}) e_k$ dan hitung G dan V_s yang baru serta ditulis dalam nilai G_b dan V_b .
5. Periksa ketelitian taksiran V_s dengan persamaan $((V_s - V_b)/V_s) \times 100\%$. Jika taksiran lebih besar dari 5% maka ulangi langkah 4 dan 5 dengan menggunakan taksiran $V_s = V_b$. Namun jika taksiran kurang atau sama dengan 5% dengan hasil perhitungan, lanjutkan dengan langkah berikut.

$$U_{max} = [2,56S_{a1}^2 + 1,12S_{a2}^2 + 0,74S_{a3}^2]$$

6. Dari grafik hubungan antara k_{max}/u_{max} dengan Y/H diperoleh nilai k_{max} . Kemudian dengan grafik hubungan antara u_k dengan k_y/k_{max} dapat ditentukan nilai deformasi (u) yang terjadi.
7. Alihan tetap yang terjadi (u) tidak boleh melampaui 50% dari tinggi jagaan (*free board*).

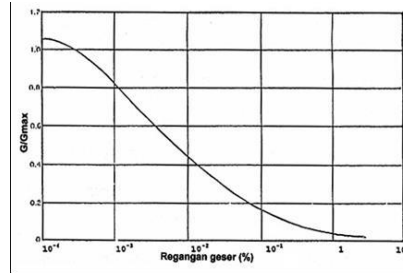
Sebagai langkah awal dalam analisis dinamik dengan metode Makdisi-Seed ini adalah mencari nilai koefisien gempa maksimum (K_h) pada beberapa tinjauan kedalaman yang menyebabkan nilai SF = 1.00, yang mana nilai ini pada akhirnya dinotasikan sebagai k_y . table 6 di bawah ini menunjukkan prosedur penentuan nilai k_y tersebut:

Dengan cara yang sama menggunakan bantuan program SLOPE, didapatkan nilai koefisien gempa kritis untuk berbagai kedalaman adalah seperti pada tabel berikut.

Tabel 3 Koefisien gempa kritis

Y/H	k_y	
	<i>Upstream</i>	<i>Downstream</i>
0.25	0.202	0.260
0.5	0.183	0.276
0.75	0.178	0.270
1	0.176	0.258

Selanjutnya langkah pengerjaan analisis dinamik ini dengan proses iterasi dengan menentukan nilai modulus geser dengan mengambil nilai regangan geser awal sebesar 10-3%. Grafik hubungan antara perbandingan modulus geser terhadap modulus geser maksimum (G/G_{max}) dengan regangan geser untuk tanah non kohesif diberikan pada gambar di bawah ini:



Gambar 16 Grafik G/G_{max} terhadap regangan geser untuk tanah Lempung
 Nilai modulus geser maksimum awal untuk tanah kohesif dapat diperkirakan dari tabel di bawah ini:

Tabel 4 Nilai Tipikal Dari Modulus Geser Awal (initial)

Tipe Tanah	Modulus Geser Awal G_{max} (kPa)
Lempung Lunak	2.750 – 13.750
Lempung Teguh (<i>firm</i>)	6.900 – 34.500
Pasir Lanauan	27.500 – 138.000
Pasir Padat dan Kerikil	69.000 – 345.000

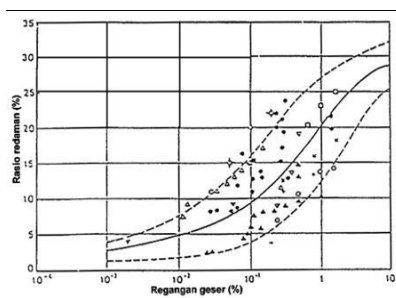
(Sumber: Analisis Dinamik Bendungan Tipe Urugan, Pedoman, BK NSPM-22)

Timbunan inti berupa lempung teguh maka nilai G_{max} diambil 20.700 kPa.

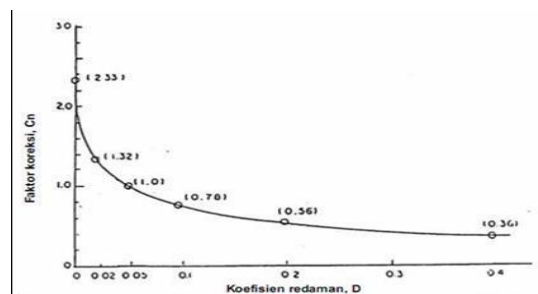
Selanjutnya nilai-nilai utama parameter dinamik tanah, yaitu cepat rambat geser (V_s), rasio redaman (D) dan faktor koreksi (C_n) dapat dicari dengan bantuan grafik-grafik. Untuk penentuan nilai cepat rambat geser (V_s), dapat digunakan formula berikut ini:

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \text{ dengan } \rho = \frac{\gamma}{g}$$

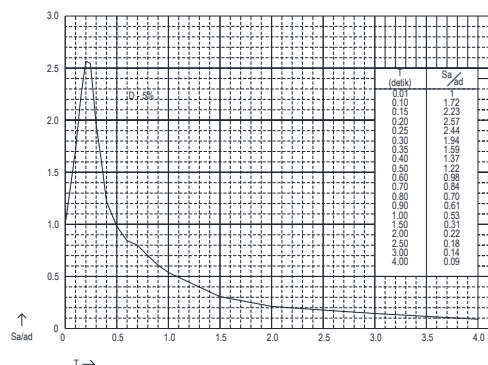
Sedangkan grafik-grafik yang dapat digunakan adalah sebagai berikut:



Gambar 17 Grafik rasio redaman terhadap regangan geser untuk tanah kohesif

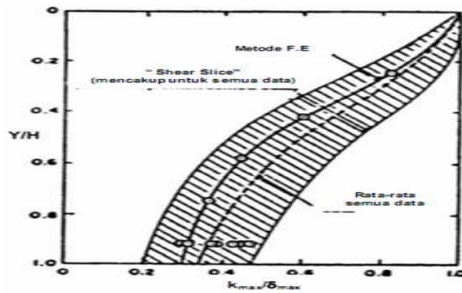


Gambar 18 Grafik rasio redaman terhadap regangan geser untuk tanah non kohesif untuk nilai rasio redaman tidak sama dengan 5%.

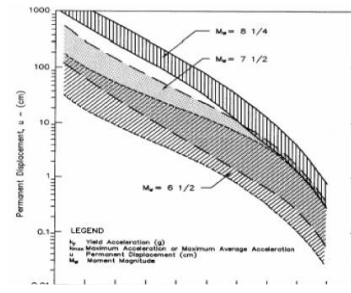


Gambar 19 Grafik Ragam percepatan gempa penormalan untuk fondasi batuan ($T_s \geq 0,25$ detik)

Selanjutnya untuk menentukan deformasi maksimum yang terjadi di puncak bendungan akibat adanya beban dinamik ini, akan digunakan bantuan grafik Y/H terhadap k_{max}/u_{max} serta grafik u_k terhadap k_y/k_{max} pada gambar di bawah ini



Gambar 20 Grafik perbandingan Y/H terhadap k_{max}/u_{max} .



Gambar 21 Grafik perbandingan deformasi terhadap k_y/k_{max} .

Dengan nilai u_{max} yang telah di dapat dan nilai-nilai k_y yang telah didapat pula, besarnya perbandingan nilai k_y terhadap k_{max} yang terjadi pada puncak bendungan dengan berbagai tinjauan kedalaman diberikan seperti tabel berikut ini:

Tabel 5 Hasil perhitungan analisis alihan tetap, arah hilir bendungan

M_s	Y/H	K_{max}	K_y	K_y / K_{max}	U_{max} (cm)
8,25	0,25	0,676	0,380	0,56	48,0
	0,50	0,567	0,310	0,55	52,0
	0,75	0,514	0,320	0,65	28,0
	1,00	0,464	0,350	1,19	0,0
7,5	0,25	0,676	0,380	0,56	16,0
	0,50	0,567	0,310	0,55	18,0
	0,75	0,514	0,320	0,65	9,0
	1,00	0,464	0,350	1,19	0,0
6,5	0,25	0,676	0,380	0,56	8,2
	0,50	0,567	0,310	0,55	8,8
	0,75	0,514	0,320	0,65	6,0
	1,00	0,464	0,350	1,19	0,0

(sumber: hasil analisis, 2024)

Dari perhitungan alihan tetap, terlihat bahwa besarnya deformasi maksimum yang terjadi akibat beban gempa maksimum adalah sebesar 52 cm, dimana hal ini masih di bawah dari batas yang diizinkan, yaitu 50% tinggi jagaan ($50\% \times 1.5 = 0.75 \text{ m} = 75 \text{ cm}$).

Dengan demikian, secara keseluruhan analisis stabilitas Bendungan Limbah tambang PT. Antam Pongkor ini masih memenuhi persyaratan yang berlaku, baik ditinjau dari akibat pembebanan statik maupun ditinjau dari pembebanan dinamik.

4. KESIMPULAN

Hasil faktor keamanan gempa stabilitas lereng Bendungan tailing PT. Antam Pongkor, kondisi gempa OBE pada lereng hulu dan hilir memenuhi persyaratan faktor keamanan yakni, $FS > 1,2$. Stabilitas lereng tailing PT. Antam Pongkor, kondisi gempa MDE pada lereng hilir dan lereng hulu (di posisi $y/H = 0,25, 0,5, 0,75$ dan 1) tidak memenuhi persyaratan ($FS < 1$), sehingga diperlukan analisis terhadap deformasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Adams, A., Hall, C., & Brouwer, K. (2019). Reducing the long term risk and enhancing the closure of tailings impoundments. In *Sustainable and Safe Dams Around the World/Un monde de barrages durables et sécuritaires* (pp. 3330-3342). CRC Press. <https://tinyurl.com/adam-et-al>
- Anbiyak, N., Sudrajat, J., & Octavya, P. E. (2020). Kerangka Regulasi Kegiatan Pascatambang Bendungan Tailing di Indonesia. *Prosiding XXIX Perhapi*. <https://prosiding.perhapi.or.id/index.php/prosiding/article/view/158/232>
- Aqla, S., & Sartika, S. (2023). Analisis Pengaruh Tailing Bauksit Terhadap Stabilisasi Tanah Dasar pada Jalan Tambang. *Jumpe: Journal of Mining, Mineral Processing, and Energy*, 1(01), 20-24. <https://doi.org/10.54866/jumpe.v1i01.1505>
- Chayati, N., Wicaksono, M. H., & Taqwa, F. M. L. (2023). Analisis Stabilitas Lereng Bendungan terhadap Beban Gempa sebagai Upaya Pengurangan Bencana (Studi Kasus: Bendungan Jlantah). *Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi*, 23(1), 1035-1042. <https://ji.unbari.ac.id/index.php/ilmiah/article/view/2249>

- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah (2004). Pedoman Konstruksi dan Bangunan Pd T-14-2004-A: Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa Bumi. https://perpustakaan.ciptakarya.pu.go.id/opac/index.php?p=show_detail&id=11573
- Firmanda, A. R. (2018). *Analisis Stabilitas Lereng Tailings Storage Facility II Proyek Tembang, Lubuklinggau, Sumatra Selatan, Berdasarkan Peta Gempa Indonesia 2010* (Undergraduate thesis, Universitas Brawijaya). <http://repository.ub.ac.id/id/eprint/167511>
- Halim, F. I., Wardani, S. P. R., & Sadono, K. W. (2025). Slope Stability Analysis of the Bener Dam Cofferdam Using PLAXIS Application for Main Dam Construction Safety. *Teknik*, 46(2), 192-199. <https://doi.org/10.14710/teknik.v46i2.68004>
- Hasibuan, T. R. (2023). *Evaluasi Perhitungan Stabilitas Bendung Di Padang Garugur Kabupaten Padang Lawas Utara* (Doctoral dissertation, Universitas Medan Area). <https://repositori.uma.ac.id/jspui/handle/123456789/25043>
- Lumentah, E., Manoppo, F. J., Sompie, O. B. A. (2021). Analisis Kestabilan Dam Tailing PT. Sumber Energy Jaya. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 11(3), 171-178. <https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/jime/article/view/36729>
- Mulyono, J. (2017). Konsepsi keamanan bendungan dalam pembangunan dan pengelolaan bendungan. *Jurnal Infrastruktur*, 3(1), 1-62.
- Mulyono, J. (2023). Operasi dan Pemeliharaan Bendungan, Embung, Situ serta Penerapan Keselamatan Konstruksi. *Online Short Course*. Engineering Institute. <https://tinyurl.com/jmulyonodam>
- Peraturan Pemerintah RI No. 37 tahun 2010 tentang Bendungan. <https://peraturan.bpk.go.id/Details/5049>
- Rojudin, D., Lutfi, M., & Taqwa, F. M. L. (2020). Analisis Keamanan Lereng Galian Tanah di Area Pertambangan Bauksit (Studi Kasus di Desa Pedalaman Kecamatan Tayan Hilir, Kabupaten Sanggau, Kalimantan Barat). In *Proceeding Civil Engineering, Environmental, Disaster and Risk Management Symposium 2020*. <https://tinyurl.com/drsanggau>
- Taqwa, F. M. L., Kholik, M., & Syaiful, S. (2017). Perhitungan Faktor Keamanan dan Pemodelan Lereng Sanitary Landfill dengan Faktor Keamanan Optimum di Klapanunggal, Bogor. In *Prosiding Seminar Nasional Teknologi dan Rekayasa*. Malang: Universitas Muhammadiyah Malang. <http://research-report.umm.ac.id/index.php/sentra/article/view/1427>
- U.S. Environmental Protection Agency. (1994). *Technical Report: Desain and Evaluation of Tailing Dams*, Washington D.C.
- Wantalangie, R. M., Legrans, R. R., & Manaroinsong, L. D. (2024). Analisis Kestabilan Embankment pada Storage Facility Pyrite Concentrate PT. Freeport Indonesia. *Tekno*, 22(87), 679-689. <https://doi.org/10.35793/jts.v22i87.55079>
- Wicaksono, D. T., Juwono, P. T., & Cahya, E. N. (2024). Analisa Stabilitas Lereng pada Bendungan Manggar di Kota Balikpapan. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 4(1), 302-311. <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2024.004.01.025>
- Wicaksono, M. H., & Muktadir, R. (2024). Stabilitas Protection Lereng Spillway Bendungan Jlantah. *Tapak (Teknologi Aplikasi Konstruksi): Jurnal Program Studi Teknik Sipil*, 13(2), 67-71. <http://dx.doi.org/10.24127/tp.v13i2.3394>
- Yusuf, M. F., Siahaan, Y., Sukiyah, E., Mulyo, A., Patonah, A., & Zakaria, Z. (2018). Pengaruh Kemiringan Lereng Terhadap Laju Sedimentasi Pada Rencana Bendungan Parigi. *Bulletin of Scientific Contribution: Geology*, 16(2), 89-100. <https://doi.org/10.24198/bsc.v16i2.17922>