Jurnal Forum Teknik Sipil, Vol. 05 No.02 Tahun 2025, pp.11-21 P-ISSN : 2776-6102
E-ISSN : 2776-8155

# *Analisis Stabilitas Lereng Pada Tubuh Bendungan Manikin*

*Slope Stability Analysis Of The Manikin Dam Embankment*

**David Peterson Sereh**[1], **Denik Sri Krisnayanti**[2], **Elsy E. Hangge**[3*)]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang 85228, Indonesia
[2]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang 85228, Indonesia
[3]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang 85228, Indonesia

Article info:

Kata kunci:

Bendungan Urugan, Stabilitas Lereng

Keywords:

Embankment Dam, Slope Stability

Article history:
Received: 20-07-2023
Accepted: 28-09-2023

*)Koresponden email:
davidsereh3@gmail.com
denik.krisnayanti@staf.undana.ac.id
elsy@staf.undana.ac.id

**Abstrak**

Bendungan Manikin merupakan bendungan tipe urugan dengan inti tegak yang dibangun untuk memenuhi kebutuhan air baku di Kabupaten Kupang, Nusa Tenggara Timur. Struktur bendungan ini terdiri dari beberapa zona material, seperti inti kedap, transisi, dan pelindung, yang berfungsi menahan aliran air serta menjaga kestabilan tubuh bendungan. Stabilitas lereng merupakan faktor penting dalam menjamin keamanan bendungan, terutama saat menghadapi kondisi ekstrem seperti gempa bumi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas lereng hulu dan hilir Bendungan Manikin pada berbagai kondisi muka air, yaitu selesai konstruksi, muka air minimum (MAM), normal (MAN), dan banjir (MAB), dengan mempertimbangkan pengaruh beban gempa tanpa gempa, OBE (Operating Basis Earthquake), dan MDE (Maximum Design Earthquake). Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak GeoStudio 2018 R2 melalui modul SLOPE/W dan SEEP/W. Hasil menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa gempa dan gempa OBE, faktor keamanan lereng memenuhi kriteria aman. Namun, pada kondisi gempa MDE, nilai faktor keamanan tidak memenuhi kriteria stabilitas, sehingga perlu dilakukan evaluasi terhadap desain geometrik dan properti material bendungan.

**Abstract**

The Manikin Dam is an earthfill dam with a vertical core, constructed to meet raw water demands in Kupang Regency, East Nusa Tenggara. The dam structure comprises several material zones, including an impervious core, transition zones, and protective shells, each serving to control seepage and maintain overall structural stability. Slope stability is a critical factor in ensuring dam safety, particularly under extreme conditions such as earthquakes. This study aims to analyze the upstream and downstream slope stability of the Manikin Dam under various water level conditions, namely end of construction, minimum water level (MWL), normal water level (NWL), and flood water level (FWL), while considering seismic loading scenarios including no earthquake, OBE (Operating Basis Earthquake), and MDE (Maximum Design Earthquake). The analysis was performed using GeoStudio 2018 R2 software, specifically the SLOPE/W and SEEP/W modules. Results indicate that the safety factors under no earthquake and OBE scenarios meet the stability criteria. However, under MDE loading, the safety factors fall below acceptable limits, indicating the need for further evaluation of the dam's geometric design and material properties.

Copy Right to J-ForTeks DOI :

## 1. Pendahuluan

Bendungan urugan merupakan salah satu struktur penting dalam infrastruktur sumber daya air, yang banyak digunakan untuk keperluan irigasi, air baku, pengendalian banjir, hingga pembangkit listrik. Stabilitas lereng tubuh bendungan menjadi aspek krusial dalam menjamin keselamatan struktur, terutama pada kondisi beban ekstrem seperti gempa. Penelitian-penelitian sebelumnya telah banyak mengkaji stabilitas lereng dengan pendekatan numerik menggunakan perangkat lunak geoteknik seperti GeoStudio, namun umumnya dilakukan pada kondisi umum atau bendungan yang telah beroperasi.

Bendungan Manikin yang saat ini sedang dibangun di Provinsi Nusa Tenggara Timur merupakan bendungan urugan dengan inti tegak yang dirancang untuk memenuhi berbagai kebutuhan air dan energi. Hingga saat ini, belum banyak kajian spesifik terkait analisis stabilitas lereng pada bendungan ini, terutama dalam kaitannya dengan skenario beban gempa seperti OBE dan MDE.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas lereng hulu dan hilir. Bendungan Manikin dalam berbagai kondisi muka air dan beban gempa menggunakan perangkat lunak GeoStudio 2018 R2 (modul SLOPE/W). Studi ini dilakukan untuk mengisi kekosongan data teknis dan memberikan rekomendasi awal terhadap aspek keamanan struktur bendungan selama tahap desain dan konstruksi.

## 2. Bahan dan Metode

Lokasi penelitan ini terletak secara administratif di Sungai Manikin, di Desa Kuaklalo, Kecamatan Taebenu, Kabupaten Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT). Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder, diantaranya data teknis bendungan, data geometri bendungan, dan data geologi atau material timbunan tubuh bendungan. Metode yang digunakan untuk perhitungan analisis dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan *software* GeoStudio, dimana untuk perhitungan stabilitas menggunakan fitur program *Slope/W*. Analisis dilakukan berdasarkan data sekunder dan metode yang digunakan, kemudian hasil analisis yang didapat dari penggunaan software GeoStudio, akan dibandingkan dengan Kriteria Faktor Kemanan Minimum untuk Stabilitas Bendungan Tipe Urugan (SNI 8064 : 2016).

### *2.1. Bendungan*

Secara umum bendungan adalah bangunan yang berupa urukan tanah, urukan batu, beton, dan pasangan batu yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, dapat pula dibangun untuk menahan dan menampung limbah tambang (*tailing*), atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk (Peraturan Pemerintah Nomor 37 Tahun 2010 Tentang Bendungan).

#### *2.1.1. Bendungan Urugan*

Dalam penelitian ini tipe bendungan digunakan merupakan bendungan urugan zonal dengan inti kedap air tegak atau "bendungan inti tegak" (*central-core fill type dam*), ialah bendungan zonal yang zona kedap airnya terletak di dalam tubuh bendungan dengan kedudukan vertikal. Biasanya inti tersebut terletak di bidang tengah dari tubuh bendungan.

### *2.2. Stabilitas*

Kegiatan utama yang dapat dilakukan untuk menentukan stabilitas bendungan, terdiri dari mengadakan analisa dan perhitungan terhadap gaya-gaya yang akan bekerja pada tubuh bendungan, pada stabilitas lereng-lereng tubuh bendungan, dan stabilitas tubuh bendungan terhadap gaya-gaya yang timbul oleh adanya aliran filtrasi di dalam tubuh bendungan tersebut (Sosrodarsono, 1977:135).

#### *2.2.1. Kriteria Nilai Faktor Keamanan Stabilitas Lereng Bendungan*

SNI 8064 : 2016 (Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Urugan), 2016:6) membahas tentang analisis stabilitas lereng statik bendungan tipe urugan dengan kriteria nilai faktor keamanan untuk berbagai kondisi bendungan, yang terdapat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Kriteria Faktor Keamanan Minimum Stabilitas Bendungan Urugan

| No | Kondisi | FK Tanpa Gempa | FK Dengan Gempa OBE | FK Dengan Gempa MDE |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Selesai Kontruksi | 1.3 | 1.2 | 1.0 |
| 2 | Evaluasi muka air normal | 1.5 | 1.2 | 1.0 |
| 3 | Elevasi muka air maksimum | 1.5 | 1.2 | 1.0 |
| 4 | Elevasi muka air minimum | 1.5 | 1.2 | 1.0 |

*2.3. Gaya-gaya Yang Bekerja Pada Bendungan*

Menurut Sosrodarsono (1977:135), gaya-gaya atau beban-beban utama yang bekerja pada bendungan urugan yang akan mempengaruhi stabilitas tubuh bendungan dan pondasi dari bendungan tersebut adalah sebagai berikut.

- Berat tubuh bendungan Sendiri
- Tekanan Hidrostatis
- Tekanan air pori
- Gaya-gaya seismis (beban gempa)

*2.4. Garis Depresi*

Garis depresi adalah garis aliran air yang berhubungan dengan bidang imajiner dalam tubuh dan pondasi bendungan yang tekanan air dan porinya sama dengan tekanan atmosfer. Formasi garis depresi pada zona kedap air suatu bendungan dapat diperoleh dengan metode Casagrande. Apabila angka permeabilitas vertikalnya ($k_v$) berbeda dengan angka permeabilitas horizontalnya ($k_h$), maka akan terjadi deformasi garis depresi dengan mengurangi koordinat horizontalnya sebesar $\sqrt{k_v/k_h}$ kali. Persamaan bentuk dasar untuk menentukan koordinat garis depresi adalah sebagai berikut :

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{y_0} \quad (1)$$

$$y = \sqrt{2y_0x + y_0^2} \quad (2)$$

$$y = \sqrt{h^2 + d^2} - d \quad (3)$$

dimana :

h = jarak vertikal antara titik-titik A dan B. (m)
d = jarak horizontal antara titik B2 dan A. (m)
$l_1$ = jarak horizontal antara titik-titik B dan E. (m)
$l_2$ = jarak horizontal antara titik-titik B dan A. (m)
A = ujung tumit hilir bendungan.
B = titik perpotongan antara permukaan air waduk dan lereng udik bendungan.
A1 = titik perpotongan antara parabola bentuk besar garis depresi dengan garis vertikal melalui titik B.
B2 = titik yang terletak sejauh 0,3/1, horizontal ke arah udik dari titik B.

*2.5. Beban Gempa*

Beban gempa merupakan beban atau gaya inersia yang timbul sebagai akibat adanya goncangan gempa di permukaan tanah. Perhitungan nilai beban gempa dilakukan dengan mengikuti pedoman konstruksi dan bangunan analisis stabilitas tubuh bendungan dengan tipe urugan akibat beban gempa berdasarkan Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Pd T-14-2004-A (Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa), 2004:1).

*2.5.1. Jenis Gempa*

1. Gempa Desain Maksimum (*Maximum Design Earthquake*, MDE)
   Gempa yang memberikan goncangan terbesar di lokasi studi yang akan digunakan untuk desain atau analisis. Untuk bendungan yang keruntuhannya akan mengancam kehidupan, gempa desain maksimum sebaiknya diambil pada batas yang sama dengan CMCE, untuk mempertahankan kapasitas pengisian waduk. Jika keruntuhan bendungan tidak mengancam kehidupan, dapat diambil gempa yang lebih kecil dari CMCE sebagai MDE. (Pd T-14-2004-A (Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa), 2004:4).
2. Gempa Dasar Operasi (*Operating Basis Earthquake*, OBE)
   Gempa dengan batasan goncangan di permukaan tanah pada lokasi studi dengan 50% kemungkinan tidak terlampaui dalam 100 tahun, yang sebaiknya ditentukan secara probabilistik. Bendungan dan bangunan pelengkap serta peralatannya harus tetap berfungsi dengan baik dan mudah perbaikannya jika terjadi gempa dasar operasi, tetapi tanpa memperhitungkan tinjauan keamanan terhadap kehidupan manusia. (Pd T-14-2004-A (Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa), 2004:4).

i. *Pengaruh Tingkat Risiko Bangunan*

Klasifikasi Kelas Risiko

Penentuan klasifiksai kelas risiko bisa didapatkan dengan menggunakan Persamaan 4 di bawah ini. Parameter klasifikasi kelas risiko didapatkan berdasarkan data teknis bendungan.

$$FR_{tot} = FR_k + FR_t + FR_e + FR_h \quad (4)$$

dengan :

$FR_{tot}$ = Faktor risiko total (bobot)
$FR_k$ = Faktor risiko kapasitas tampung
FRt = Faktor risiko tinggi bendungan
FRe = Faktor risiko kebutuhan evakuasi
$FR_h$ = Faktor risiko tingkat kerusakan

Menghitung kelas risiko menggunakan Persamaan 4 diatas, selanjutnya Tabel 2 berikut memberikan bobot untuk penentuan kelas risiko.

**Tabel 2.** Kriteria faktor risiko untuk evaluasi keamanan bendungan

| Faktor Risiko | Angka bobot dalam kurung | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Ekstrem** | **Tinggi** | **Moderat** | **Rendah** |
| Kapasitas ($10^6$ $m^3$) ($FR_k$) | >100 (6) | 100-1,25 (4) | 1,00-0,125 (2) | <0,125 (0) |
| Tinggi (m) ($FR_t$) | >45 (6) | 45-30 (4) | 30-15 (2) | <15 (0) |
| Kebutuhan evakuasi (jumlah orang) ($Fr_e$) | >1000 (12) | 1000-100 (8) | 100-1 (4) | 0 (0) |
| Tingkat kerusakan hilir ($FR_h$) | Sangat Tinggi (12) | Tinggi (10) Agak Tinggi (8) | Moderat (4) | Tidak Ada (0) |

Adapun untuk Kriteria beban gempa, setelah mendapatkan nilai faktor risiko, selanjutnya yaitu menentukan kriteria beban gempa dengan menentukan kelas risiko. Parameter untuk penentuan kelas risiko dan kriteria beban gempa dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.

**Tabel 3.** Kelas risiko bendungan dan bangunan air

| Faktor Risiko Total | Kelas Risiko |
|---|---|
| (0-6) | I (rendah) |
| (7-18) | II (Moderat) |
| (19-30) | III (Tinggi) |
| (31-36) | IV (Ekstrem) |

**Tabel 4.** Kriteria beban gempa untuk desain bendungan

| Kelas risiko dengan masa guna | Persyaratan tanpa kerusakan | | Persyaratan diperkenankan ada kerusakan tanpa keruntuhan | |
|---|---|---|---|---|
| | T (thn) | Metode Analisis | T (thn) | Metode Analisis |
| IV N=50-100 | 100 – 200 ad ≥ 0,1 g | Koef Gempa | 10.000 (MDE) | Koef. gempa atau dinamik * |
| III N=50-100 | 50 – 100 ad ≥ 0,1 g | Koef Gempa | 5000 (MDE) | Koef. gempa atau dinamik * |
| II N=50-100 | 50-100 ad ≥ 0,1 g | Koef Gempa | 3000 (MDE) | Koef. gempa atau dinamik * |
| I N=50-100 | 50-100 ad ≥ 0,1 g | Koef Gempa | 1000 (MDE) | Koef. gempa atau dinamik * |

ii. *Koefisien Beban Gempa*

Koefisien beban gempa ditentukan dengan metode nilai percepatan gempa maksimum terkoreksi (*peak ground acceleration,* PGA). Persamaan untuk mencari koefisien gempa dasar (Kh) sebagai berikut.

$$K_h = \frac{PGA_M}{g} \quad (5)$$

$$PGA_M = S_{PGA} \times F_{PGA} \quad (6)$$

$$K_0 = \alpha_2 \times K_h \quad (7)$$

dengan :

$PGA_M$ = percepatan puncak di permukaan tanah (1 g = 980,665 cm/detik²)
$K_h$ = koefisien gempa dasar
$S_{PGA}$ = percepatan kejut dasar (cm/detik²)
$F_{PGA}$ = faktor amplikasi
g = percepatan gravitasi (9,81 m/detik²)
$K_o$ = koefisien gempa desain terkoreksi di permukaan tanah
$\alpha_2$ = koreksi pengaruh jenis struktur, untuk bendungan tipe urugan = 0,5.

Nilai F pada rumus gaya gempa tergantung pada lokasi konstruksi, sesuai dengan peta zona gempa yang menunjukkan tingkat resiko gempa pada suatu wilayah. Faktor amplikasi dapat dilihat pada Tabel 5.

**Tabel 5.** Faktor Amplikasi ($F_{PGA}$)

| Kelas Situs | $S_{PGA}$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | PGA = 0,1 | PGA = 0,2 | PGA = 0,3 | PGA = 0,4 | PGA = 0,5 |
| Batuan Keras ($S_A$) | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| Batuan ($S_B$) | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Tanah Keras ($S_C$) | 1,2 | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 1,0 |
| Tanah Sedang ($S_D$) | 1,6 | 1,4 | 1,2 | 1,1 | 1,0 |
| Tanah Lunak ($S_E$) | 2,5 | 1,7 | 1,2 | 0,9 | 0,9 |
| Tanah Khusus ($S_F$) | SS | SS | SS | SS | SS |

Perhitungan dilakukan pada Y/H 0,25; 0,5; 0,75; dan 1,0 menggunakan persamaan berikut.

Untuk 0 < Y/H = 0,4

$$K = K_o \times \left(2{,}5 - 1{,}85 \times \left(\frac{Y}{H}\right)\right) \quad (8)$$

Untuk 0,4 < Y/H = 1,0

$$K = K_o \times \left(2{,}0 - 0{,}60 \times \left(\frac{Y}{H}\right)\right) \quad (9)$$

dengan :

K = koefisien gempa pada kedalaman Y dari puncak bendungan
Ko = koefisien gempa terkoreksi di permukaan tanah

*b. Metode Fellenius (1927)*

Analisis stabilitas lereng cara Fellenius (1927) oleh Hardiyatmo (2002:360), menganggap gaya-gaya yang bekerja pada sisi kanan-kiri dari sembarang irisan mempunyai resultan nol pada arah

tegak lurus bidang longsor. Dengan anggapan ini, keseimbangan arah vertikal dan gaya-gaya yang bekerja dengan memperhatikan tekanan air pori.

Bila terdapat air pada lereng, tekanan air pori pada bidang longsor tidak menambah momen akibat tanah yang longsor (Md), karena resultan gaya akibat tekanan air pori lewat titik-titik pusat lingkaran. Substitusi Persamaan diatas sehingga memperoleh Persamaan 10.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} ca_i + (W_i \cos\theta_i - u_i a_i) tg\varphi}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin\theta_i} \quad (10)$$

dengan :

$F$ = faktor aman
$c$ = kohesi tanah (kN/m2)
$\varphi$ = sudut gesek dalam tanah (derajat)
ai = panjang lengkung lingkaran pada irisan ke-i (m)
Wi = berat irisan tanah ke-i (kN)
ui = tekanan air pori pada irisan ke-i (kN/m2)
θi = sudut yang didefinisikan (derajat)

*c. Software Geostudio*

GeoStudio adalah perangkat lunak pemodelan untuk insinyur geospasial dan ilmuwan geologi. Kemampuan untuk menganalisis secara akurat dan mengintegrasikan alat-alat khusus dan terapan di bidang rekayasa geofisika dan ilmu bumi telah menjadikan perangkat lunak ini alat yang baik di antara para ahli di bidang ini.

d. *Program SLOPE/W*

Program komputer *SLOPE/W* adalah bagian dari Geostudio yang berfungsi untuk menganalisis SF (*safety factor*/faktor keamanan) lereng. *SLOPE/W* dapat menganalisis masalah stabilitas baik secara sederhana maupun kompleks dengan menggunakan salah satu dari delapan metode kesetimbangan (*Limit Equilibrium*) batas untuk berbagai permukaan yang miring.

## 3. Hasil dan Pembahasan

Sebelum menganalisis stabilitas tubuh bendungan, baik stabilitas lereng (*SLOPE/W*) ataupun garis freatik bendungan (*SEEP/W*). Perlu dilakukan analisis tingkat risiko bendungan. Tujuan dilakukan analisis tersebut agar dapat mengetahui kelas tingkat risiko Bendungan Manikin dan juga menentukan koefisien gempa yang digunakan untuk menganalisis stabilitas tubuh Bendungan Manikin.

*a. Analisis Tingkat Risiko Bendungan*

Menganalisis tingkat risiko bertujuan untuk menentukan klasifikasi kelas risiko suatu bendungan. Perhitungan tingkat risiko evaluasi keamanan bendungan menggunakan Persamaan 4, yang kemudian ditentukan kelas risiko bendungan berdasarkan Tabel 2, berikut ini hasil analisis risiko Bendungan Manikin yang kemudian akan dirangkum pada Tabel 6.

**Tabel 6.** Tingkat Risiko Bendungan Manikin

| No | Faktor Risiko | | Kategori | Nilai |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Faktor risiko kapasitas amping (frk) | 20,45 juta $m^3$ | Tinggi | 4 |
| 2 | Faktor risiko tinggi bendungan (FRt) | 50,0 m | Ekstrem | 6 |
| 3 | Faktor risiko kebutuhan evakuasi (Fre) | 100-1000 | Tinggi | 8 |
| 4 | Faktor risiko tingkat kerusakan (FRh) | Sangat Tinggi | Ekstrem | 12 |
| | **Jumlah** | | | **30** |

Berdasarkan hasil nilai faktor risiko total Bendungan Manikin adalah 30, kemudian dilihat pada Tabel 2, kelas risiko Bendungan Manikin tergolong dalam kelas III (tinggi). Dengan demikian, untuk gempa *Operating Basis Earthquake* (OBE) menggunakan kala ulang 100 tahun, sedangkan untuk gempa *Maximum Design Earthquake* (MDE) menggunakan kala ulang 5000 tahun.

*b. Koefisien Gempa*

Berdasarkan hasil perhitungan analisis tingkat risiko Bendungan Manikin diatas, maka perhitungan koefisien gempa OBE menggunakan periode ulang 100 tahun dan perhitungan koefisien gempa MDE menggunakan periode ulang 5000 tahun.

i. *Koefisien Gempa OBE*

Perhitungan koefisien gempa OBE periode ulang 100 tahun berdasarkan peta gempa Indonesia 2017, jenis tanah setempat pada Tabel 5, data teknis tubuh Bendungan Manikin, dan juga berdasarkan Persamaan 5 hingga Persamaan 9. Hasil perhitungan koefisien gempa OBE dapat dilihat pada Tabel 7.

**Tabel 7.** Rekapitulasi Koefisien Gempa OBE

| Periode Ulang T Tahun | $S_{PGA}$ | $F_{PGA}$ | $PGA_M$ | $K_o$ | $K_h$ | K pada Y/H | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1,00 |
| 100 | 0,175 | 1 | 0,175 | 0,088 | 0,175 | 0,178 | 0,149 | 0,136 | 0,123 |

Berdasarkan Tabel 7, hasil perhitungan koefisien gempa OBE termodifikasi pada setiap kedalaman Y dari puncak bendungan diperoleh sebagai berikut, untuk 0,25 Y/H = 0,178; 0,5 Y/H = 0,149; 0,75 Y/H = 0,136; 1,00 Y/H = 0,123.

ii. *Koefisien Gempa MDE*

Perhitungan koefisien gempa MDE periode ulang 5000 tahun berdasarkan peta gempa Indonesia 2017, jenis tanah setempat pada Tabel 5, data teknis tubuh Bendungan Manikin, dan juga berdasarkan Persamaan 5 hingga Persamaan 9. Hasil perhitungan koefisien gempa MDE dapat dilihat pada Tabel 8.

**Tabel 8.** Rekapitulasi Koefisien Gempa MDE

| Periode Ulang T Tahun | $S_{PGA}$ | $F_{PGA}$ | $PGA_M$ | $K_o$ | $K_h$ | K pada Y/H | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1,00 |
| 5000 | 0,550 | 1 | 0,550 | 0,275 | 0,550 | 0,560 | 0,468 | 0,426 | 0,385 |

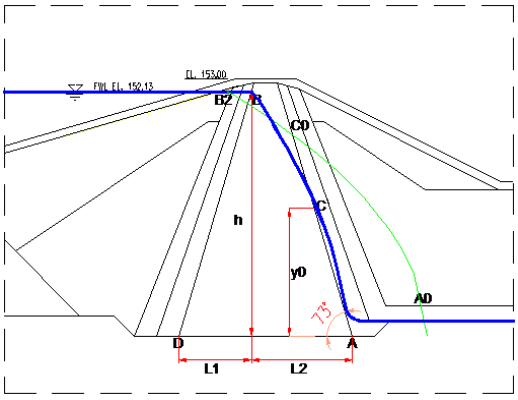
Berdasarkan Tabel 8, hasil perhitungan koefisien gempa MDE termodifikasi pada setiap kedalaman Y dari puncak bendungan diperoleh sebagai berikut, untuk 0,25 Y/H = 0,560; 0,5 Y/H = 0,468; 0,75 Y/H = 0,426; 1,00 Y/H = 0,385.

*c. Perhitungan Garis Freatik Tubuh Bendungan*

Garis freatik akan ditentukan untuk kondisi muka air banjir, muka air normal, dan muka air minimum.

i. *Garis Freatik Muka Air Banjir*

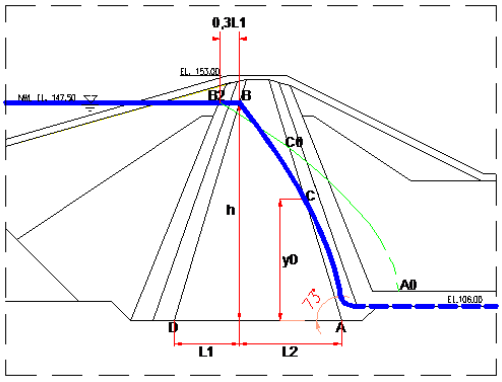
Perhitungan garis freatik muka air banjir menggunakan data geometri potongan tubuh bendungan, dan menggunakan Persamaan 1 hingga Persamaan 3 untuk penggambaran garis freatik. Hasil perhitungan untuk penggambaran garis freatik muka air banjir dapat dilihat pada Gambar 1.




**Gambar 1.** Garis Freatik Bendungan Manikin pada muka air banjir

ii. *Garis Freatik Muka Air Normal*

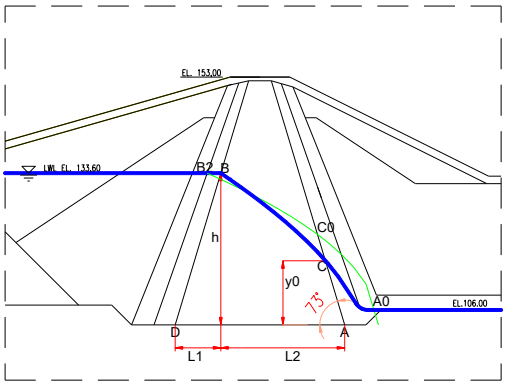
Perhitungan garis freatik muka air normal menggunakan data geometri potongan tubuh bendungan, dan menggunakan Persamaan 1 hingga Persamaan 3 untuk penggambaran garis freatik. Hasil perhitungan untuk penggambaran garis freatik muka air normal dapat dilihat pada Gambar 2.




**Gambar 2.** Garis Freatik Bendungan Manikin pada muka air normal

iii. *Garis Freatik Muka Air Minimum*

Perhitungan garis freatik muka air minimum menggunakan data geometri potongan tubuh bendungan, dan menggunakan Persamaan 1 hingga Persamaan 3 untuk penggambaran garis freatik. Hasil perhitungan untuk penggambaran garis freatik muka air minimum dapat dilihat pada Gambar 3.




**Gambar 3.** Garis Freatik Bendungan Manikin pada muka air minimum

*d. Stabilitas Tubuh Bendungan Dengan Geostudio*

i. *Stabilitas Tubuh Bendungan Tanpa Gempa*

Untuk tahap analisis ini dilakukan pada empat kondisi yaitu selesai konstruksi, muka air banjir, muka air normal, dan muka air minimum. Setiap kondisi dalam analisis ini tidak ditambahkan beban gempa. Hasil perhitungan Geostudio *SLOPE/W*, dapat dilihat pada Tabel 9.

**Tabel 9.** Rekapitulasi Faktor Keamanan Tubuh Bendungan Tanpa Gempa

| Kondisi | Faktor Keamanan (FK) Minimum | FK Geostudio | |
|---|---|---|---|
| | | Hulu | Hilir |
| Selesai konstruksi | 1,300 | 5,444 | 1,779 |
| Muka Air Normal (MAN) El. +147,50 m | 1,500 | 4,008 | 1,677 |
| Muka Air Banjir (MAB) El. +152,13 m | 1,500 | 3,926 | 1,677 |
| Muka Air Minimum (MAM) El. +133,60 m | 1,500 | 4,104 | 1,677 |

Berdasarkan Tabel 9 faktor keamanan pada setiap kondisi tanpa beban gempa, baik bagian hulu maupun hilir, dinyatakan aman atau stabil, karena faktor keamanannya lebih besar dari faktor keamanan minimum.

ii. *Stabilitas Tubuh Bendungan Dengan Gempa OBE*

Untuk tahap analisis ini dilakukan pada empat kondisi yaitu selesai konstruksi, muka air banjir, muka air normal, dan muka air minimum. Setiap kondisi dalam analisis ini ditambahkan beban gempa OBE. Hasil perhitungan Geostudio *SLOPE/W*, dapat dilihat pada Tabel 10.

**Tabel 10.** Rekapitulasi Faktor Keamanan Tubuh Bendungan Gempa OBE

| Kondisi | | Gempa OBE (100 tahun) | | | | Faktor Keamanan (FK) Minimum |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0,25 Y/H | 0,50 Y/H | 0,75 Y/H | 1,00 Y/H | |
| | | K = 0,178 | K = 0,149 | K = 0,136 | K = 0,123 | |
| Selesai Konstruksi | Hulu | 1,924 | 2,058 | 2,003 | 2,116 | 1,200 |
| | Hilir | 1,467 | 1,384 | 1,348 | 1,290 | 1,200 |
| Muka Air Normal (MAN) El. +147,50 m | Hulu | 1,343 | 1,404 | 1,400 | 1,919 | 1,200 |
| | Hilir | 1,443 | 1,376 | 1,336 | 1,273 | 1,200 |
| Muka Air Banjir (MAB) El. +152,13 m | Hulu | 1,386 | 1,465 | 1,436 | 1,967 | 1,200 |
| | Hilir | 1,433 | 1,369 | 1,335 | 1,272 | 1,200 |
| Muka Air Minimum (MAM) El. +133,60 m | Hulu | 1,913 | 1,560 | 1,577 | 2,217 | 1,200 |
| | Hilir | 1,443 | 1,376 | 1,336 | 1,270 | 1,200 |

Berdasarkan Tabel 10 faktor keamanan pada setiap kondisi dengan beban gempa OBE, baik bagian hulu maupun hilir, dinyatakan aman atau stabil, karena faktor keamanannya lebih besar dari faktor keamanan minimum.

iii. *Stabilitas Tubuh Bendungan Dengan Gempa MDE*

Untuk tahap analisis ini dilakukan pada empat kondisi yaitu selesai konstruksi, muka air banjir, muka air normal, dan muka air minimum. Setiap kondisi dalam analisis ini ditambahkan beban gempa MDE. Hasil perhitungan Geostudio *SLOPE/W*, dapat dilihat pada Tabel 11.

**Tabel 11.** Rekapitulasi Faktor Keamanan Tubuh Bendungan Gempa MDE

| Kondisi | | Gempa MDE (5000 tahun) | | | | Faktor Keamanan (FK) Minimum |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0,25 Y/H | 0,50 Y/H | 0,75 Y/H | 1,00 Y/H | |
| | | K = 0,560 | K = 0,468 | K = 0,426 | K = 0,385 | |
| Selesai Konstruksi | Hulu | 0,935 | 1,020 | 1,032 | 1,139 | 1,000 |
| | Hilir | 0,770 | 0,762 | 0,770 | 0,766 | 1,000 |
| Muka Air Normal (MAN) El. +147,50 m | Hulu | 0,592 | 0,575 | 0,578 | 0,848 | 1,000 |
| | Hilir | 0,760 | 0,758 | 0,763 | 0,757 | 1,000 |
| Muka Air Banjir (MAB) El. +152,13 m | Hulu | 0,531 | 0,571 | 0,579 | 0,850 | 1,000 |
| | Hilir | 0,749 | 0,753 | 0,762 | 0,756 | 1,000 |
| Muka Air Minimum (MAM) El. +133,60 m | Hulu | 0,929 | 0,749 | 0,735 | 1,066 | 1,000 |
| | Hilir | 0,760 | 0,757 | 0,763 | 0,755 | 1,000 |

Berdasarkan Tabel 11, faktor keamanan hampir di setiap kondisi dengan beban gempa MDE, baik bagian hulu maupun hilir, dinyatakan tidak aman atau tidak stabil, karena faktor keamanannya lebih kecil dari faktor keamanan minimum.

## 4. Kesimpulan

Analisis stabilitas lereng tubuh Bendungan Manikin menunjukkan bahwa kondisi lereng dinyatakan stabil pada setiap kondisi tanpa gempa dan saat mengalami beban gempa OBE (*Operating Basis Earthquake*). Namun, pada beban gempa MDE (*Maximum Design Earthquake*), beberapa kondisi lereng, khususnya di area hilir, tidak memenuhi kriteria stabilitas, kecuali pada bagian hulu dengan rasio kedalaman tertentu. Temuan ini menekankan pentingnya evaluasi lebih lanjut dan perkuatan lereng untuk kondisi gempa maksimum sebagai bagian dari upaya mitigasi risiko bendungan.

## Daftar Pustaka

Ansori, M. B., & Edijatno, S. R. S. (2018). *Irigasi dan Bangunan Air Modul Kuliah*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Asiyanto. (2011). *Metode Konstruksi Bendungan* (1st ed.). Universitas Indonesia (UI Press).

Badan Standarisasi Nasional. (2016). *SNI 8064-2016: Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Urugan*. Badan Standarisasi Nasional.

Google Earth. (2023). *Peta Lokasi Bendungan Manikin pada Google Earth*.

Krisdianto, F. (2021). *Analisis Stabilitas Pada Tubuh Bendungan Dengan Irisan Fellenius Dan Debit Rembesan Dengan Metode Casagrande Menggunakan Software Geostudio*.

*Peraturan Pemerintah Nomor 37 Tahun 2010 tentang Bendungan*. (n.d.).

PT. Indra Karya (Persero). (n.d.). *Sertifikasi Desain dan Model Test Bendungan Tefmo / Manikin Kabupaten Kupang*.

Saidillah, M. (2021). *Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Saradan*.

Sandi, I. K. (2020). *Analisis Stabilitas Tubuh Bendungan Menggunakan Metode Bishop dan Perhitungan Rembesan dengan Pendekatan Metode Cassagrande*.

Sidharta. (1997). *Irigasi dan Bangunan Air*. Universitas Gunadarma.

Side, M. A. (2022). *Analisis Stabilitas Lereng dengan Perkuatan Tiang (Pile) Menggunakan Pemodelan Dua Dimensi*.

Sosrodarsono, S., & Takeda, K. (1977). *Bendungan Type Urugan*. PT. Pradnya Paramita.