

## Studi Analisis Stabilitas Tubuh Bendungan pada Bendungan Banyu Urip dengan Menggunakan Software Geostudio 2018 di Kabupaten Bojonegoro Jawa Timur

Silviya Ekasari<sup>(\*)</sup>

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Widyagama, Malang, Jawa Timur  
Email: sisildesign123@gmail.com

Abdul Halim<sup>(\*\*)</sup>

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Widyagama, Malang, Jawa Timur  
Email: abah.ef7@gmail.com

Riman

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Widyagama, Malang, Jawa Timur  
Email: riman@widyagama.ac.id

### Abstrak

Tubuh bendungan merupakan bagian paling penting yang berfungsi sebagai penyangga aliran air dan rembesan. Bendungan urugan tipe zonal harus dianalisis berdasarkan desain zona-zona penyusun tubuh bendungan. Karena besarnya rembesan dan nilai keamanan strabilitas bendungan dipengaruhi oleh besar ketebalan zona-zona tubuh bendungan. Pada penelitian ini bertujuan menganalisa stabilitas tubuh bendungan Banyu terhadap kelongsoran lereng dan rembesan air. Analisis stabilitas tubuh bendungan menggunakan metode Simplified Bishop dimana akan dibandingkan antara perhitungan manual dengan menggunakan Software Geostudio. Hasil analisis Geoslope menunjukkan bahwa bagian hulu bendungan menghasilkan nilai FS 3,021 > 1,50 dan adanya pengaruh gempa menghasilkan FS 1,633 > 1,20. Untuk nilai FS pada rapid draw down hulu bendungan menghasilkan nilai FS 3,234 > 1,30 dan adanya pengaruh gempa menghasilkan FS 1,718 > 1,10. Dengan demikian bendungan dinyatakan aman kestabilannya pada kondisi setelah selesai konstruksi (tanpa genangan air), muka air normal, muka air banjir, rapid draw down dan adanya pengaruh gempa pada Y/H: 0,25; 0,50; 0,75; 1,00.

**Kata-kata Kunci:** Gempa, tanah lempung, analisis stabilitas slope/W, metode bishop, goestudio

### Abstract

The body of the dam is the most important part that serves as a buffer for water flow and seepage. Zonal type urugan dams should be analyzed based on the design of the constituent zones of the dam body. Due to the magnitude of seepage and the safety value of the dam's strability, it is influenced by the thickness of the dam body zones. This study aims to analyze the stability of the Banyu dam body against slope landslides and water seepage. Analysis of the stability of the dam body using the Simplified Bishop method which will be compared between manual calculations using Geostudio Software. The results of Geoslope analysis showed that the upstream part of the dam produced FS values of 3.021 > 1.50 and the influence of the earthquake produced FS 1.633 > 1.20. For the FS value in the rapid draw down upstream of the dam produced an FS value of 3.234 > 1.30 and the influence of the earthquake resulted in FS 1.718 > 1.10. Thus the dam is declared safe stability in conditions after completion of construction (without waterlogging), normal water level, flood water level, rapid draw down and the influence of earthquakes on Y/H: 0.25; 0,50; 0,75; 1,00.

**Keywords:** Earthquake, clay, slope/W stability analysis, bishop method, goestudio.

### 1. Pendahuluan

Bendungan Banyu Urip terletak di Desa Mojodelik, Kecamatan Gayam, Kabupaten Bojonegoro, pada aliran Sungai Ngasem dengan koordinat 7° 11' 40,00" LS dan 111° 41' 53,30" BT. Lokasi sekitar 5 km dari jalan raya negara Bojonegoro-Cepu Jawa Timur. Tipe bendungan

pada bendungan Banyu Urip merupakan bendungan urugan tanah zonal, volume tampungan maksimum 2.534.450 m<sup>3</sup>, luas genangan waduk maksimum 0,41 km<sup>2</sup> dan elevasi puncak bendungan El. +50,50 m. Tubuh bendungan banyu urip didesain dengan kemiringan hulu dan hilir 1 : 4,0. Panjang puncak bendungan yaitu 2490 m dengan elevasi puncak sekitar 50 m dan lebar

\* Penulis: sisildesign123@gmail.com

\* Korespondensi: abah.ef7@gmail.com

puncak 12 m. Tinggi bendungan adalah sebelas (11) meter diukur dari dasar reservoir, dan tujuh belas (17) meter diukur dari galian terdalam dasar (Dam Stability Analysis Bendungan Banyu Urip, 2021).

Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 tahun tentang pemantauan dan pemeriksaan kondisi bendungan, pemeriksaan besar besaran terhadap bendungan harus dilakukan setiap 5 tahun sekali. Stabilisasi bendungan adalah hal terpenting yang harus dilakukan saat menguji sebuah bendungan. Keamanan bendungan merupakan faktor penting dalam stabilisasi bendungan.

Berdasarkan Nanda and Hamdhan 2016 bendungan dengan tipe urugan sangat riskan terhadap keruntuhan (*collapse*) diantaranya keruntuhan akibat beban gempa yang diterima maupun dari geometrik bendungan itu sendiri. Maka dari itu, perlu dilakukan evaluasi terhadap keamanan tubuh Bendungan Banyu Urip untuk mengetahui tingkat keamanan pada tubuh Bendungan Banyu Urip yang ditinjau dari kestabilan lereng bendungan akibat material tubuh bendungan yang terjadi dan ketika dikombinasikan dengan beban gempa. Hasil analisis akan menampilkan nilai faktor keamanan serta kemungkinan terjadinya longsor ataupun erosi pada bidang tubuh bendungan baik dihilu (*upstream*) ataupun di hilir (*downstream*).

## 2. Tinjauan Pustaka

### 2.1 Jenis bendungan

Pada penelitian ini jenis bendungan yang digunakan yaitu bendungan urugan diklasifikasikan sebagai jenis geozona, jika tanggul yang membangun badan bendungan mengandung unsur batuan dengan kadar yang berbeda

(diurutkan berdasarkan ukuran butir) dalam urutan tanggul tertentu. Pada tipe bendungan penyangga ini, beban terutama diterapkan pada tanggul drainase (daerah bocor), sedangkan penahan kedap air bekerja pada tanggul kedap air (daerah tertutup). Berdasarkan letak dan letak septumnya, jenis ini dapat dibedakan menjadi 3 (tiga), yaitu: 1) Bendungan zona kedap air membangun udik bendungan tersebut merupakan dengan zonal bendungan tirai; 2) Bendungan zona kedap airnya yang terdapat didalam tubuh bendungan dan kedudukannya lereng mengarah ke hilir merupakan zonal bendungan inti miring; dan 3) Bendungan yang kedap airnya diletakkan di dalam tubuh bendungan itu sendiri dengan posisi kedudukannya secara vertical merupakan zonal bendungan inti tegak. (Sosrodarsono, 2020)

### 2.2 Tanah

Kekuatan geser suatu massa tanah merupakan perlawanan internal tanah tadi per satuan luas terhadap keruntuhan atau pergeseran sepanjang bidang geser pada tanah yang dimaksud. Untuk menganalisis perkara stabilitas tanah misalnya daya dukung, stabilitas lereng, maka kita wajib mengetahui sifat-sifat ketahanan penggesernya tanah tersebut (Sudjianto, 2020).

### 2.3 Pengaruh gempa

Pada penelitian ini pengaruh gempa yang digunakan yaitu, gempa dasar operasi (*Operational Basis Earthquake*, OBE); dan Gempa Desain Maksimum (*Maximum Design Earthquake*, MDE).

### 2.4 Angka keamanan

Nilai banding antara gaya yang sifatnya menahan dengan gaya yang sifatnya penggerak merupakan definisi dari faktor keamanan.

Tabel 1. Persyaratan faktor keamanan minimum stabilitas bendungan urugan\*) untuk OBE; sedangkan untuk MDE,  $FK \geq 1$

No.	Kondisi	Kuat Geser	Tekanan air pori	FK tanpa gempa	FK dengan gempa
1.	Selesai pembangunan tergantung : 1. Jadwal pembangunan 2. Hubungan antara tekanan pori dan waktu	Efektif	Peningkatan tekanan air pori pada timbunan dan pondasi dihitung menggunakan data lab. Dan pengawasan instrument.	1,30	1,20
	Lereng U/S dan D/S		Idem hanya tanpa pengawasan instrumen	1,40	1,20
	Dengan gempa tanpa kerusakan digunakan 50% koef. Gempa desain		Hanya pada timbunan tanpa data lab. Dan dengan/tanpa pengawasan instrumen	1,30	1,20
		Total	Tanpa pengawasan instrumen	1,30	1,20
2.	Aliran Langgeng tergantung : 1. Elevasi muka air normal sebelah udik 2. Elevasi muka air normal sebelah hilir Lereng U/S dan D/S Dengan gempa tanpa kerusakan digunakan koef.50% Gempa desain	Efektif	Dari analisis rembesan	1,50	1,20
	3.		Pengoperasian waduk tergantung : 1. Elevasi muka air maksimum di udik 2. Elevasi muka air minimum di udik (Dead storage)	Efektif	Surut cepat dari elevasi muka air normal sampai muka air minimum Lereng U/S dan D/S
Lereng U/S harus dianalisis untuk kondisi surut cepat		Surut cepat dari elevasi muka air minimal. Pengaruh gempa diambil 0% dari koefisien gempa desain	1,30		-
4.	Kondisi darurat tergantung	Efektif	Surut cepat dari elevasi muka air	1,20	-

(Sumber: Depatemen Permukiman dan Prasarana Wilayah 2004)

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (1)$$

Dimana :

$F_s$  = Faktor Keamanan terhadap kekuatan tanah

$\tau_f$  = Kekuatan geser material

$\tau_d$  = Tegangan geser rata-rata yang bekerja sepanjang bidang longsor

### 2.5 Teori kelongsoran

Pada penelitian ini yang dimaksud analisis stabilitas adalah untuk menentukan faktor aman dari bidang longsor yang potensial. Dalam penelitian ini, dasar-dasar teori yang dipakai untuk menyelesaikan masalah tentang stabilitas longsor dan daya dukung tanah menggunakan teori Metode Bishop (*Bishop's Method*).

Faktor keamanan terhadap longsor didefinisikan sebagai perbandingan kekuatan geser maksimum yang dimiliki tanah di bidang longsor ( $S_{tersedia}$ ) dengan tahanan geser yang diperlukan untuk keseimbangan ( $S_{perlu}$ ).

$$FK = \frac{S_{perlu}}{B S_{tersedia}} \quad (2)$$

Bila kekuatan geser tanah adalah :

$$\begin{aligned} (S_{tersedia}) &= c' + (\sigma - \mu) \tan \theta' \\ &= c' + s \tan \theta' \end{aligned}$$

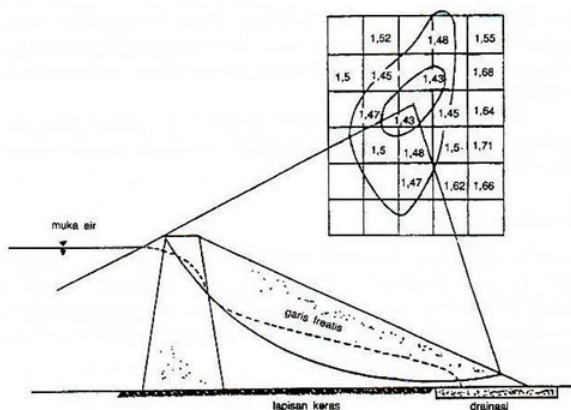
Maka tahanan geser yang diperlukan untuk keseimbangan adalah :

$$(S_{perlu}) = \frac{1}{F \cdot K} (c' + (\sigma - \mu) \tan \theta') \quad (3)$$

Faktor keamanan dihitung berdasarkan rumus :

$$FK = \frac{1}{m \cdot a} \frac{(c' b + (W - \mu b) \tan \theta')}{W_{\sin \alpha}} \quad (4)$$

Biaya/harga m.a masih naik dari **Gambar 1**. Strategi pengaturannya adalah dengan mencoba kembali (eksperimen) biaya elemen keamanan FK di sebelah kiri elemen kondisi kesejahteraan di atas, dengan menggunakan **Gambar 2** untuk mempercepat estimasi. Faktor keamanan yang ditunjukkan oleh teknik ini tidak sesuai kenyataan, terlalu besar, ketika titik negatif (-) dari kemiringan terkecil mendekati 30°. Kondisi ini dapat



Gambar 1. Contoh kontur faktor aman (Hardiyatmo 2007a)

muncul ketika lingkaran longsor sangat dalam atau titik fokus belokan yang diandalkan dekat dengan titik kemiringan tertinggi. Faktor kesejahteraan yang diperoleh dari teknik Bishop lebih menonjol daripada yang didapat dari strategi Fellenius.

## 3. Metode Penelitian

### 3.1 Lokasi penelitian

Secara Geografis Proyek Waduk Banyu Urip terletak pada koordinat 111° 41'53.53" BT dan 7° 11'40"LS, berada di Desa Mojodelik Kecamatan Gayam, Kabupaten Bojonegoro Jawa Timur. Lokasi proyek berada di Selatan ruas Jalan Negara Bojonegoro – Cepu dengan jarak kurang lebih 5 km. Lokasi proyek bisa diakses dari Kota Surabaya dengan menggunakan perjalanan darat sejauh 140 km atau kurang lebih 4 jam perjalanan.

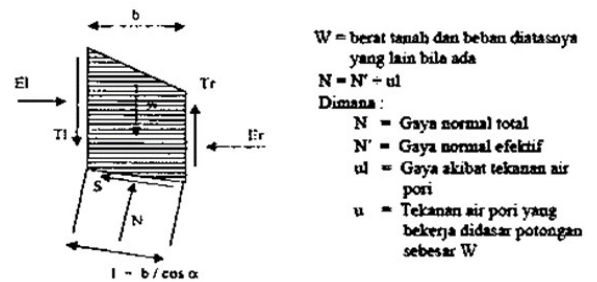
### 3.2 Data analisis stabilitas

Pada penelitian ini ada tiga data yang akan digunakan untuk menganalisis stabilitas pada tubuh bendungan antara lain sebagai berikut :

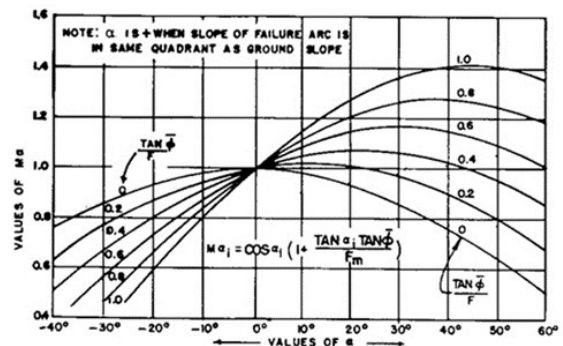
1. Data Geologi Bendungan;
2. Data Material Bendungan; dan
3. Data Teknis Bendungan.

### 3.3 Tahapan proses analisis dengan software geostudio 2018 R2 (Slope/W)

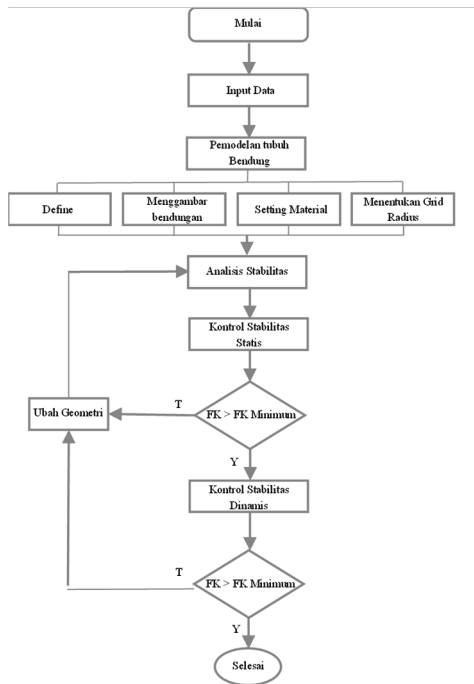
Pada tahapan proses stabilitas tubuh bendungan dengan menggunakan software geostudio 2018 R2 untuk analisis Slope/W bisa dilihat pada bagan alir (**Gambar 4**).



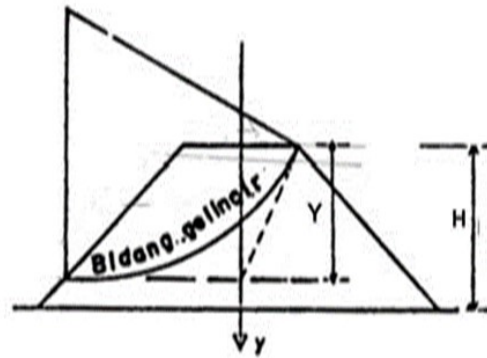
Gambar 2. Sistem gaya pada suatu elemen menurut bishop (Bishop, 2020)



Gambar 3. Grafik m.a untuk persamaan bishop (Bishop 2020)



Gambar 4. Bagan alir proses analisis dengan software geostudio 2018 R2 (Slope/W)



Gambar 5. Profil bendungan tipikal

Untuk  $0 < Y/H \leq 0,4 \rightarrow$  yaitu  $Y/H = 0,25 \rightarrow$  maka:

$$K_f = K_0 \times (2,5 - 1,85Y/H)$$

Untuk  $0,4 < Y/H \leq 1,0 \rightarrow$  yaitu  $Y/H = 0,50$  ;

$Y/H = 0,75$  ; dan  $Y/H = 1,00 \rightarrow$  maka:

$$K_f = K_0 \times (2,0 - 0,60Y/H)$$

Ringkasan hasil perhitungan koefisien gempa untuk analisis stabilitas Bendungan Banyu Urip dapat dilihat pada Tabel 3.

## 4. Hasil dan Pembahasan

### 4.1 Kelas risiko bendungan

Penentuan kelas risiko digunakan untuk menentukan besar perioda ulang percepatan gempa yang akan digunakan, mengacu kepada “Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Gempa” (No: 360/KPTS/M/2004 - Pd. T-14-2004).

### 4.2 Perhitungan koefisien gempa

Dalam analisis stabilitas ini, koefisien gempa pada kedalaman Y (Y = kedalaman dari puncak bendungan) berbeda-beda. Sesuai Pedoman No: 360/KPTS/M/2004 - Pd. T-14-2004 tentang Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Gempa (halaman 50), disebutkan bahwa untuk analisis stabilitas, peninjauan dilakukan pada  $Y = 0,25H$ ;  $0,50H$ ;  $0,75H$  dan  $1H$  (dimana H = tinggi bendungan) dengan menggunakan PGAM pada periode ulang sesuai yang dipersyaratkan. Koefisien gempa rata-rata K pada Y yang berbeda-beda dapat dihitung dengan persamaan-persamaan sebagai berikut:

Tabel 2. Kelas risiko RWB Banyu Urip

No.	Pengaruh Risiko	Ukuran	Faktor Risiko	Bobot
1	Kapasitas ( $10^6 \text{ m}^3$ )	1,25 - 100	$FR_k$	4
2	Tinggi (m)	17	$FR_t$	2
3	Kebutuhan evakuasi (jumlah orang)	100 - 1	$FR_e$	4
4	Tingkat kerusakan hilir	Moderat	$FR_n$	4
			$FR_{tot}$	14
			Klasifikasi	Moderat (II)

Sumber: Hasil Analisis, 2021

### 4.3 Parameter material

Untuk kebutuhan data berdasarkan Laporan dari Summary Lab Test; IDBC-RH-CRSIT-NP0002. Berikut Tabel 4 adalah parameter yang akan digunakan untuk analisis stabilitas.

### 4.4 Analisis stabilitas tubuh bendungan

#### 4.4.1 Analisis stabilitas dengan software geostudio slope/W 2018 R2

Pada analisis Slope/W ini input data yang perlu dilakukan yaitu seperti input material tanah, input beban gempa pada kedalaman bendungan ( $Y/H 0.25$ ,  $Y/H 0.5$ ,  $Y/H 0.75$ , dan  $Y/H 1$ ), input grid radius dan input garis freatik.

#### 4.4.2 Analisis stabilitas dengan perhitungan manual metode bishop

Pada analisis stabilitas tubuh bendungan ini menggunakan pembandingan antara perhitungan manual dengan menggunakan Software Goestudio. Berikut ini adalah salah satu perhitungan manual metode bishop:

##### 1) Kondisi MAN Tanpa Gempa Hulu

Perhitungan Manual

##### a. Lebar Irisan (b)

Lebar irisan ini ditentukan berdasarkan pada gambar cad irisan stabilitas. Berikut ini adalah Gambar 7 lebar irisan stabilitas.

##### b. Jarak R ke pusat irisan ( $X_i$ )

Untuk menentukan jarak R ke pusat irisan dapat dilihat pada Gambar 8.

Berikut ini perhitungan koefisien gempa sesuai dengan persamaan diatas, yaitu :

Periode Ulang T (100) → Gempa OBE		Periode Ulang T (2500) → Gempa MDE	
$PGA_M$	$= F_{PGA} \times S_B$	$PGA_M$	$= F_{PGA} \times S_B$
	$= 1 \times 0,16 \text{ g}$		$= 1 \times 0,48 \text{ g}$
	$= 0,16 \text{ g}$		$= 0,48 \text{ g}$
$K_0$	$= a \times PGA_M$	$K_0$	$= a \times PGA_M$
	$= 0,5 \times 0,16$		$= 0,5 \times 0,48$
	$= 0,080$		$= 0,240$
$K_h$	$= PGA_M / g$	$K_h$	$= PGA_M / g$
	$= 0,16 / 0,981$		$= 0,48 / 0,981$
	$= 0,163$		$= 0,489$
Y/H	$= 0,25 \rightarrow \text{maka:}$	Y/H	$= 0,25 \rightarrow \text{maka:}$
$K_f$	$= K_0 \times (2,5 - 1,85Y/H)$	$K_f$	$= K_0 \times (2,5 - 1,85Y/H)$
	$= 0,080 \times (2,5 - (1,85 \times 0,25))$		$= 0,240 \times (2,5 - (1,85 \times 0,25))$
	$= 0,163$		$= 0,489$
Y/H	$= 0,50 \rightarrow \text{maka:}$	Y/H	$= 0,50 \rightarrow \text{maka:}$
$K_f$	$= K_0 \times (2,0 - 0,60 Y/H)$	$K_f$	$= K_0 \times (2,0 - 0,60 Y/H)$
	$= 0,080 \times (2,0 - (0,60 \times 0,50))$		$= 0,240 \times (2,0 - (0,60 \times 0,50))$
	$= 0,136$		$= 0,408$
Y/H	$= 0,75 \rightarrow \text{maka:}$	Y/H	$= 0,75 \rightarrow \text{maka:}$
$K_f$	$= K_0 \times (2,0 - 0,60 Y/H)$	$K_f$	$= K_0 \times (2,0 - 0,60 Y/H)$
	$= 0,080 \times (2,0 - (0,60 \times 0,75))$		$= 0,240 \times (2,0 - (0,60 \times 0,75))$
	$= 0,124$		$= 0,372$
Y/H	$= 1,00 \rightarrow \text{maka:}$	Y/H	$= 1,00 \rightarrow \text{maka:}$
$K_f$	$= K_0 \times (2,0 - 0,60 Y/H)$	$K_f$	$= K_0 \times (2,0 - 0,60 Y/H)$
	$= 0,080 \times (2,0 - (0,60 \times 1,00))$		$= 0,240 \times (2,0 - (0,60 \times 1,00))$
	$= 0,112$		$= 0,336$

**Tabel 3. Percepatan gempa untuk analisis stabilitas akibat gempa bendungan**

No.	Periode Ulang T	SB	FPGA	PGAm	K <sub>0</sub>	Kh	K <sup>*</sup> pada Y/H			
							0,25	0,5	0,75	1
1	100	0,16	1	0,160	0,080	0,163	0,163	0,160	0,124	0,112
2	2500	0,48	1	0,480	0,240	0,489	0,489	0,408	0,372	0,336

Sumber: Hasil Analisis, 2021

**Tabel 4. Parameter Material Bendungan Banyu Urip**

No.	Parameter	Unit	Material					Foundation Clay
			Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	
			Chimney	Horiz-Filter	Rip-rap	Local Clay	Malo Clay	
1	y sat	KN/m <sup>3</sup>	20,99	20,99	19,02	17,95	17,85	16,08
2	y dry	KN/m <sup>3</sup>	18,24	18,24	18,83	14,32	14,32	
3	Cohesion	KN/m <sup>2</sup>	0	0	0	22,36	24,12	164,75
4	Friction Angle	°	35	35	42	9,12	21	4,2
5	Permeability Coeff.	cm.det	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-02	1,00E-04	1,00E-09	1,00E-08

Sumber: Hasil Pengujian

Untuk jarak yang berada di luar garis 0 (di kanan) dikatakan bertanda negatif (-). Sebagai contoh irisan no. 1 dengan jarak 2,61 m sesuai dengan gambar diatas menjadi -2,61 m.

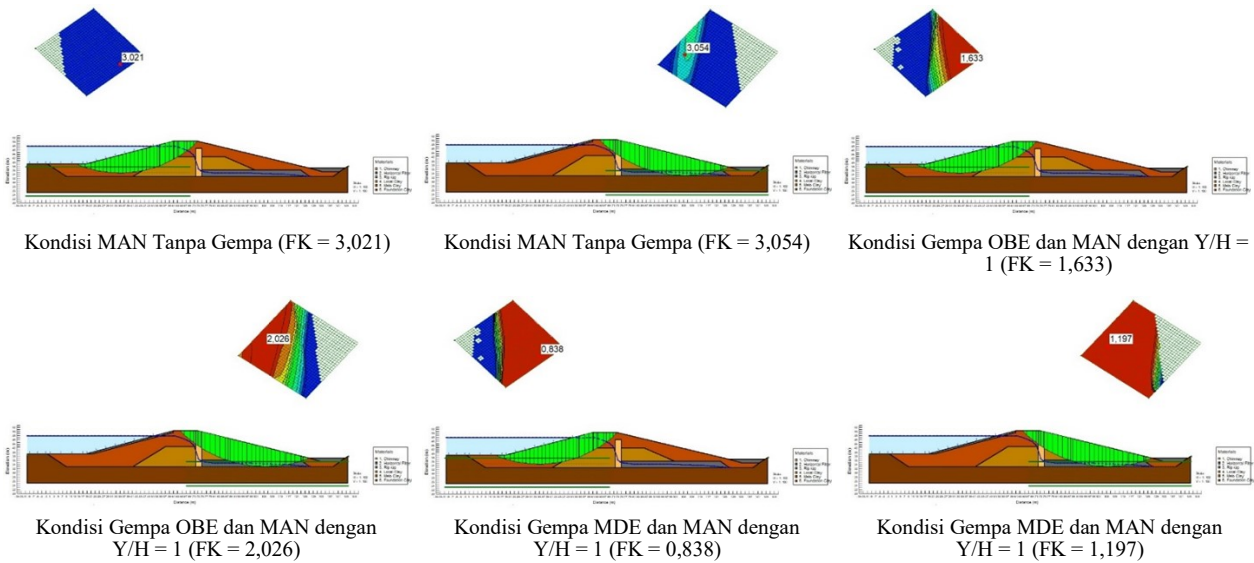
c. Radius Bidang Gelincir (R)

Untuk menentukan radius bidang gelincir bisa di lihat pada **Gambar 9**.

d. Tinggi Irisan (h)

Untuk menentukan tinggi irisan bisa di lihat pada **Gambar 10**.

Berikut ini salah satu hasil gambar dan rekapitulasi nilai SF (*safety factor*) yang dihasilkan:



Berikut ini adalah rekapitulasi hasil analisis stabilitas tubuh bendungan Banyu Urip:

Tabel 5. Hasil rekapitulasi analisis stabilitas tubuh bendungan Banyu Urip

KONDISI TANPA GEMPA						
Kondisi	Faktor keamanan				Persyaratan Faktor Keamanan (FS) Minimum	Keterangan
	Hulu		Hilir			
Muka air Normal (MAN)	3,021		3,054		1,50	Memenuhi
Muka air banjir (MAB)	3,226		3,115		1,50	Memenuhi
Rapid draw down	3,324		3,158		1,50	Memenuhi
KONDISI GEMPA OBE						
Kondisi	Koefisien gempa (g)				Persyaratan Faktor Keamanan (FS) Minimum	Keterangan
	0,163	0,160	0,124	0,112		
	Faktor keamanan (g)					
	Y/H= 0,25	Y/H= 0,50	Y/H= 0,75	Y/H= 1,0		
Muka air normal (MAN) Hulu	1,346	1,360	1,555	1,633	1,20	Memenuhi
Muka air normal (MAN) Hilir	1,753	1,767	1,954	2,026	1,20	Memenuhi
Muka air banjir (MAB) Hulu	1,411	1,426	1,631	1,713	1,20	Memenuhi
Muka air banjir (MAB) Hilir	1,825	1,839	2,024	2,095	1,20	Memenuhi
Rapid draw down Hulu	1,415	1,429	1,634	1,718	1,20	Memenuhi
Rapid draw down Hilir	1,846	1,860	2,048	2,120	1,20	Memenuhi
KONDISI GEMPA MDE						
Kondisi	Koefisien gempa (g)				Persyaratan Faktor Keamanan (FS) Minimum	Keterangan
	0,489	0,408	0,372	0,336		
	Faktor keamanan (g)					
	Y/H= 0,25	Y/H= 0,50	Y/H= 0,75	Y/H= 1,0		
Muka air normal (MAN) Hulu	0,626	0,723	0,776	0,838	1,00	Tidak memenuhi
Muka air normal (MAN) Hilir	0,931	1,056	1,122	1,197	1,00	Memenuhi kecuali Y/H=0.25
Muka air banjir (MAB) Hulu	0,676	0,771	0,825	0,889	1,00	Tidak memenuhi
Muka air banjir (MAB) Hilir	1,020	1,141	1,206	1,280	1,00	Memenuhi

Berikut ini adalah salah satu contoh perhitungan tinggi irisan, yaitu :

$$\begin{aligned} \text{Irisan 1} &: 0,5 \times (\text{tinggi irisan 0} + \text{tinggi irisan ke-1}) \\ &= 0,5 \times (0 + 2,27) \\ &= 1,14 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Irisan 2} &: 0,5 \times (\text{tinggi irisan ke-1} + \text{tinggi irisan ke-2}) \\ &= 0,5 \times (2,27 + 4,95) \end{aligned}$$

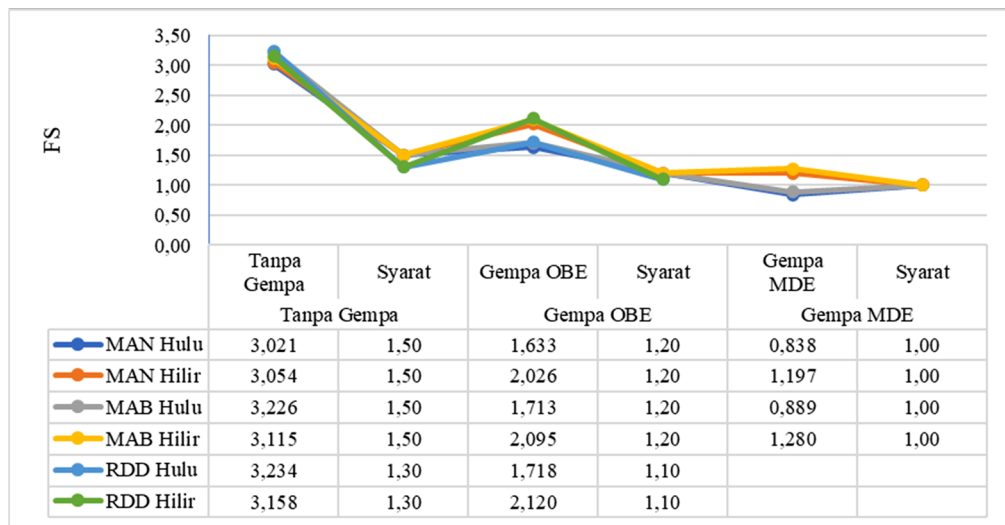
$$= 3,61 \text{ m}$$

Untuk irisan ke 3 s.d ke 11 proses perhitungannya sama dengan irisan ke 2. Sedangkan untuk yang irisan ke 12, yaitu :

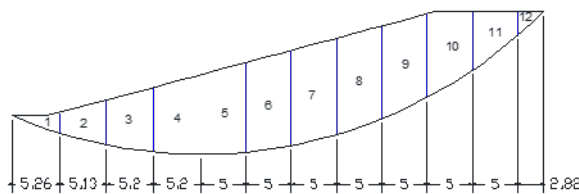
$$\begin{aligned} \text{Irisan 12} &: 0,5 \times \text{tinggi irisan ke 11} \\ &= 0,5 \times 2,65 \\ &= 1,33 \text{ m} \end{aligned}$$



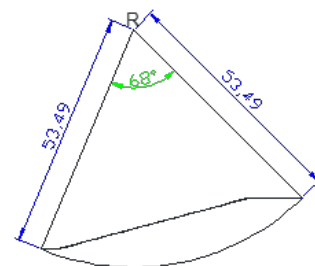
Berikut ini adalah grafik hasil rekapitulasi analisis stabilitas tubuh bendungan Banyu Urip dengan Software Geostudio Slope/W 2018 R2.



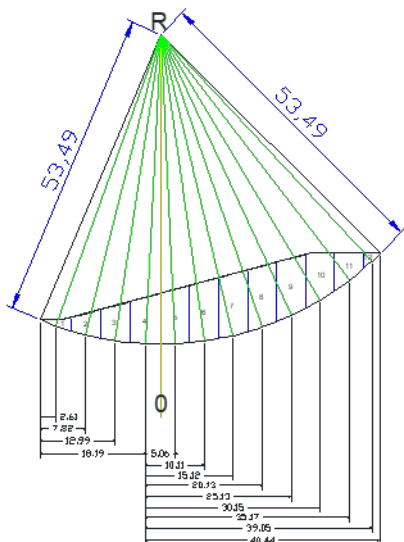
Gambar 6. Grafik stabilitas tubuh bendungan Banyu Urip pada hasil analisis 2021



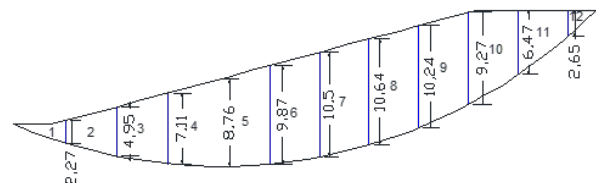
Gambar 7. Irisan stabilitas



Gambar 9. Radius bidang gelincir (R)



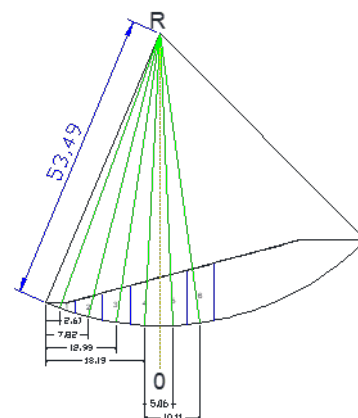
Gambar 8. Jarak R ke pusat irisan (Xi)



Gambar 10. Tinggi irisan (h)

e. Sudut tiap Irisan ( $^\circ$ )

Berikut ini adalah salah satu contoh perhitungan sudut tiap irisan, yaitu :



Gambar 11. Sudut tiap irisan

$$\text{Irisan 1} \rightarrow e = \sin^{-1} \times (\text{jarak R ke pusat irisan} / \text{radius bidang gelincir})$$

$$= \sin^{-1} \times (-2,61 / 53,49)$$

$$= -2,80$$

f. Radians, Sin a, Cos a, Tan a

Pada perhitungan ini untuk Radians bisa dihitung berdasarkan sudut tiap irisan. Sedangkan Sin a, Cos a, Tan a didapat dari Radians.

g. Berat Jenis Tanah (g)

Pada berat jenis tanah ini disesuaikan dengan bidang gelincir pada tiap material yang ada di tubuh bendungan. Berikut ini adalah salah satu contoh perhitungan berat jenis tanah, yaitu :

No. Irisan 1

Zona 3 (Rip-Rap)  $\rightarrow \gamma_{\text{sat}} = 19,02 \text{ kN/m}^3$

Tabel 6. Parameter material tanah

No.	Parameter	Unit	Material					Foundation
			Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	
			Chimney	Horiz-Filter	Rip-rap	Local Clay	Malo Clay	
1	Kohesi Tanah	kN/m <sup>2</sup>	0	0	0	22,36	24,12	164,75
2	Sudut Geser Tanah	°	35	35	42	9,12	21	4,2

Tabel 7. Perhitungan metode bishop kondisi MAN tanpa gempa hulu

No. Irisan	Lebar irisan (m)	Jarak R ke pusat irisan (m)	Radius Bid. Gelincir (m)	Tinggi irisan (m)	Sudut tiap irisan (°)	Radians	Sin a	Cos a	Tan a.	Material				
	(b)	(X) <sub>i</sub>	(R)	(h)	(a)					Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
	a	b	c	d	e = Sin <sup>-1</sup> (b/c)					f	g	h	20,986	20,986
1	5,26	-2,61	53,49	1,14	-2,80	-0,05	-0,05	1,00	-0,05				19,02	17,85
2	5,13	-7,82	53,49	3,61	-8,41	-0,15	-0,15	0,99	-0,15				19,02	17,85
3	5,20	-12,99	53,49	6,03	-14,05	-0,25	-0,24	0,97	-0,25				19,02	17,85
4	5,20	-18,19	53,49	7,94	-19,88	-0,35	-0,34	0,94	-0,36				19,02	17,85
5	5,00	5,06	53,49	9,32	5,43	0,09	0,09	1,00	0,10				19,02	17,85
6	5,00	10,11	53,49	9,96	10,89	0,19	0,19	0,98	0,19				19,02	17,85
7	5,00	15,12	53,49	10,35	16,42	0,29	0,28	0,96	0,29				19,02	17,95
8	5,00	20,13	53,49	10,44	22,11	0,39	0,38	0,93	0,41				19,02	17,95
9	5,00	25,13	53,49	9,76	28,02	0,49	0,47	0,88	0,53				19,02	17,95
10	5,00	30,15	53,49	7,87	34,31	0,60	0,56	0,83	0,68				19,02	17,95
11	5,00	35,17	53,49	4,56	41,11	0,72	0,66	0,75	0,87					17,85
12	2,82	39,05	53,49	1,33	46,89	0,82	0,73	0,68	1,07					17,85
Σ														
Faktor Keamanan Kontrol,														

Tabel 8. Perhitungan metode bishop kondisi MAN tanpa gempa hulu lanjutan

No. Irisan	Berat Jenis Tanah (kN/m <sup>3</sup> )	Sudut Geser Tanah (°)	Radians	Tan φ	Kohesi Tanah (kN/m <sup>2</sup> )	Pore pressure (m)	(kN)	Berat Irisan (kN)	Fiterasi 2,94	b	a	Resisting Moment (kN.m)	Driving Moment (kN.m)							
	(γ)	(φ)			(C)	(m)								(m.b)	(C.b)	(Wt = b.h.γ)	Mi	1/Mi	C.b+(Wt-u.b)tanθ	Wt * Sin a
	j	k			l	m								n	o	p = o x a	q = n x a	r = a x d x j	s	t
1	18,44	21,00	0,37	0,38	24,12	-48,00	-252,48	126,87	110,07	0,99	1,01	266,04	268,07	-5,37						
2	18,44	21,00	0,37	0,38	24,12	-48,00	-246,24	123,74	341,43	1,07	1,03	349,32	360,06	-49,92						
3	18,44	21,00	0,37	0,38	24,12	-51,50	-267,80	125,42	578,09	0,94	1,(,)7	450,13	479,70	-140,39						
4	18,44	21,00	0,37	0,38	24,12	-53,00	-275,60	125,42	760,73	0,90	1,12	523,23	583,96	-258,70						
5	18,44	21,00	0,37	0,38	24,12	-53,00	-265,00	120,60	858,68	1,01	0,99	551,94	547,63	81,23						
6	18,44	21,00	0,37	0,38	24,12	-53,00	-265,00	120,60	918,14	1,01	0,99	574,76	570,97	173,53						
7	18,27	9,12	0,16	0,16	22,36	-53,00	-265,00	111,80	945,17	0,97	1,03	306,07	314,03	267,17						
8	18,27	9,12	0,16	0,16	22,36	-53,00	-265,00	111,80	953,85	0,95	1,06	307,47	324,66	358,97						
9	18,27	9,12	0,16	0,16	22,36	-53,00	-265,00	111,80	891,27	0,91	1,10	297,42	327,40	418,72						
10	18,27	9,12	0,16	0,16	22,36	-53,00	-265,00	111,80	719,04	0,86	1,17	269,77	314,86	405,29						
11	17,85	21,00	0,37	0,38	24,12	-52,00	-260,00	120,60	406,94	0,84	1,19	376,61	448,72	267,56						
12	17,85	21,00	0,37	0,38	24,12	-52,00	-146,64	68,02	66,69	0,78	1,28	149,91	192,51	48,69						
Σ																				
Nilai Faktor Keamanan																				
Kontrol,																				
FK = Re.sisting Moment / D1*ing Moment																				
Kondisi Lereng Stabil																				
FS Pada Program Geo Studio																				
Selisih																				



$$\begin{aligned} \text{Zona 5 (Melo Clay)} \rightarrow \gamma_{\text{sat}} &= 17,85 \text{ kN/m}^3 \\ \text{Berat Jenis Tanah (g)} &= (\text{Zona 3} + \text{Zona 5}) / 2 \\ &= (19,02 + 17,85) / 2 \\ &= 18,44 \text{ kN/m}^3 \end{aligned}$$

Untuk no. irisan 2 s.d irisan ke 12 proses perhitungannya sama sesuai tahapan seperti penjabaran diatas.

**h. Sudut Geser Tanah ( $\alpha$ ), dan Kohesi Tanah (C)**

Sudut geser tanah dan kohesi tanah ini didapatkan dari parameter material tanah. Parameter tersebut bisa dilihat pada **Tabel 6**.

**i. Kohesi tanah pada irisan (C.b)**

$$\begin{aligned} \text{kohesi tanah pada irisan} &= \text{kohesi tanah (kN/m}^2\text{)} \times \\ &\quad \text{lebar irisan (m)} \\ &= 24,12 \times 5,26 \\ &= 126,87 \text{ kN} \end{aligned}$$

**j. Pore Preassure**

Pada pore preassure ini untuk irisan no. 1 muka air normal terdapat pada elevasi -48.00.

$$\begin{aligned} \text{Pore Preassure} &= \text{muka air normal} \times \text{lebar irisan} \\ &= -48,00 \times 5,26 \\ &= -252,48 \end{aligned}$$

**k. Berat Irisan Tanah**

Untuk menentukan berat irisan tanah pada metode bishop ini akan dijelaskan mengenai proses tahapan perhitungannya antara lain sebagai berikut :

Irisan 1

Berat Irisan (kN)

$$\begin{aligned} W_t &= \text{lebar irisan} \times \text{tinggi irisan} \times \text{berat jenis tanah} \\ &= 5,26 \times 1,14 \times 18,44 \\ &= 110,07 \text{ kN} \end{aligned}$$

Selanjutnya untuk irisan ke 2-12 proses perhitungannya sama sesuai tahapan seperti penjabaran diatas. Setelah semua nya selesai dihitung, irisan ke 1 – ke 12 di jumlahkan.

**l.  $F_{\text{iterasi}} (M_i)$**

Untuk nilai  $F_{\text{iterasi}} = 3,02$  ini disesuaikan dengan iterasi yang ada pada hasil  $FK = \text{Resisting Moment} / \text{Driving Moment}$ , sehingga didapatkan hasil perhitungan antara lain sebagai berikut :

$$\begin{aligned} F_{\text{iterasi}} &= \text{Cos } \alpha \times (1 + \text{Tan } \alpha \times \text{Tan } f / F_{\text{iterasi}}) \\ &= 1,00 \times (1 + (-0,05) \times 0,38 / 3,02) \\ &= 0,99 \end{aligned}$$

**m. Jarak Irisan pada bidang gelincir (b)**

Pada tahapan ini b (jarak) diperoleh dari perhitungan dibawah ini:

$$\begin{aligned} b &= 1 / M_i \\ &= 1 / 0,99 \\ &= 1,01 \end{aligned}$$

**n. FK pada metode bishop (a)**

Pada tahapan perhitungan ini, u.b didapatkan pada data tekanan pori. Untuk data tekanan pori ini nilainya sama dengan 0.

**FK pada metode bishop (a)**

$$\begin{aligned} &= \text{kohesi tanah pada irisan} + (\text{berat irisan} - \text{pore} \\ &\quad \text{preassure}) \times \text{tanq (sudut geser tanah)} \\ &= 126,87 + (110,07 - (-252,48)) \times 0,38 \\ &= 266,04 \end{aligned}$$

**o. Resisting Moment (kN.m)**

$$\begin{aligned} \text{Resisting Moment} &= \text{Jarak Irisan pada bidang gelincir} \\ &\quad \times \text{FK pada metode bishop} \\ &= 1,01 \times 266,04 \\ &= 268,07 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

**p. Driving Moment (kN.m)**

$$\begin{aligned} \text{Driving Moment} &= \text{berat irisan tanah} \times \text{Sin } \alpha \text{ pada} \\ &\quad \text{radians sudut tiap irisan} \\ &= 110,07 \times -0,05 \\ &= -5,37 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

## 5. Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan penelitian ini, maka dapat diambil kesimpulan yaitu, faktor keamanan stabilitas tubuh bendungan pada hasil analisis tahun 2021 dibagian MAN hulu, yaitu 3,021; MAN hilir, yaitu 3,054.
2. Dengan Persyaratan Faktor Keamanan Minimum 1,50, maka hasil analisis stabilitas tubuh bendungan ini dikatakan aman. faktor keamanan stabilitas tubuh bendungan pada hasil analisis tahun 2021 dibagian MAB hulu, yaitu 3,226; MAB hilir, yaitu 3,115. Dengan Persyaratan Faktor Keamanan Minimum 1,50, maka hasil analisis stabilitas tubuh bendungan ini dikatakan aman. faktor keamanan stabilitas tubuh bendungan pada hasil analisis tahun 2021 dibagian RDD hulu, yaitu 3,234; MAB hilir, yaitu 3,158.
3. Dengan Persyaratan Faktor Keamanan Minimum 1,30, maka hasil analisis stabilitas tubuh bendungan ini dikatakan aman. faktor keamanan stabilitas tubuh bendungan pada hasil analisis tahun 2021 dibagian MAN OBE hulu, yaitu 1,633; MAN OBE hilir, yaitu 2,026.
4. Dengan Persyaratan Faktor Keamanan Minimum 1,200, maka hasil analisis stabilitas tubuh bendungan ini dikatakan aman. Kondisi faktor keamanan stabilitas tubuh bendungan pada hasil analisis tahun 2021 dibagian RDD OBE hulu, yaitu 1,718; RDD OBE hilir, yaitu 2,120. Kondisi faktor keamanan stabilitas tubuh bendungan pada hasil analisis tahun 2021 dibagian MAN MDE hulu, yaitu 0,838; MAN MDE hilir, yaitu 1,197. Dengan Persyaratan Faktor Keamanan Minimum 1,100, maka hasil analisis stabilitas tubuh bendungan ini dikatakan aman.
5. Berdasarkan kesimpulan tersebut, maka terdapat beberapa saran yaitu, perlu diadakan penelitian dengan menggunakan metode-metode lain sebagai pembanding mengenai faktor keamanan stabilitas tubuh bendungan; perlu di review lagi mengenai

faktor keamanan pada kondisi gempa MDE yang diperoleh hasil tidak memenuhi untuk beberapa kondisi, sehingga analisis bisa dilanjutkan dengan analisis deformasi permanen; dan perlu diadakan evaluasi terhadap retakan yang ada pada tubuh bendungan agar bendungan bisa terkontrol dengan baik saat diadakan kegiatan instrumentasi.

## Daftar Pustaka

- Badan Standardisasi Nasional. 2012. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Non Gedung*. www.bsn.go.id.
- Bishop, Alan W. 1955. "The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes." *Geotechnique* 5(1): 7–17.
- Dam Stability Analysis, Bendungan Banyu Urip. 2021.
- Depatemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. 2004. *Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa*.
- GEO-SLOPE International. 2008. "Stability Modeling with SLOPE/W 2007." In *Engineering Methodology*, GEO-SLOPE.
- GEO-SLOPE International. 2012. "Stability Modeling with SLOPE/W." In *An Engineering Methodology*, GEO-SLOPE. <http://www.geo-slope.com>.
- Gouw, Tjie Liong. 2012. "Analisis Kestabilan Tanah Limit Equilibrium vs Finite Element Method." Universitas Bina Nusantara & Dave Juven George Herman. <http://tambangunp.blogspot.com/2018/08/limit-equilibrium-method-lem-atau.html> (February 24, 2021).
- Hardiyatmo, Hary Christady. 2007. "Mekanika Tanah." In Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Indonesia. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2010, Presiden Republik Indonesia.
- Moch. Sholeh dkk. 2019. "Analisis Stabilitas Tubuh Bendungan Pada Bendungan Utama Proyek Aduk Bendo Ponorogo." *PROKONS* 13: 2.
- Mohr. 1910. *Geotechnical Engineering Investigation Manual*. McGrawHill Book.
- Nanda, dan Hamdhan. 2016. "Analisis Rembesan Dan Stabilitas Bendungan Bajulmati Dengan Metode Elemen Hingga Model 2D Dan 3D." *Reka Racana* 2(4). <https://ejurnal.itenas.ac.id/> (February 24, 2021).
- Sepriadi dan Andre M. P. 2019. "Analisis Kestabilan Lereng Dengan Metode Keseimbangan Batas Pada Lereng High Wall Pit 1 Utara Tambang Banko Barat Menggunakan Software Geostudio Slope/W 2018 Di Pt Bukit Asam, Tbk. Tanjung Enim, Sumatera Selatan." *Patra Akademika* 10.
- Septian, Chandra. 2018. "Analisis Kestabilan Lereng Dan Metodenya." LAVACAKE. <https://mistergendon95.blogspot.com/2018/09/analisis-kestabilan-lereng-dan-metodenya.html> (February 24, 2021).
- Sosrodarsono dkk. 1981. *Bendungan Type Urugan*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Sudjipto. 2020. "Mekanika Tanah I (Konsep Dasar dan Pengukuran Laboratorium)." Jakarta: Intimedia,
- Terzaghi. 1935. "Discussion on 'Uplift and Seepage under Dams on Sand.'" *ASCE Transactions*: 1391–95.
- Zaid dkk. 2014. "Analisis Stabilitas Lereng Bendungan Jatigede Dengan Parameter Gempa Termodifikasi."