

ANALISIS PERKUATAN PONDASI BENDUNGAN TUGU DENGAN GROUTING YANG DISIMULASIKAN DENGAN PROGRAM PLAXIS V8.6.

Rima Dwi Ning Ayu

Mahasiswa S1 Teknik Sipil, Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
rimaayu@mhs.unesa.ac.id

Mochamad Firmansyah Sofianto, S.T, M.T, M.Sc

Dosen Teknik Sipil, Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Abstrak

Bendungan Tugu yang terletak di Kabupaten Trenggalek, Provinsi Jawa Timur. Bendungan ini direncanakan memiliki daerah luas genangan sebesar 41,70 ha dengan kapasitas tampungan efektif sebesar 7,80 x 10⁶ m³. Bendungan Tugu dibangun untuk dapat mengantisipasi banjir yang kerap melanda di daerah Kabupaten Trenggalek yang terjadi secara rutin setiap tahun. Dengan cadangan air tertampung yang begitu besar maka perlu dilakukan antisipasi yang cukup baik dan serius terhadap batuan pondasi bendungan, agar secara keseluruhan bendungan ini terhindar dari kebocoran dan keruntuhan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana stabilitas pondasi Bendungan Tugu sebelum dan sesudah dilakukan perkuatan tanah dengan teknik *grouting*. Analisis dilakukan menggunakan perhitungan manual dan simulasi *software Plaxis v.8.6*. Ditinjau dalam 3 (tiga) kondisi yaitu, muka air normal, muka air rendah, dan muka air banjir. Berdasarkan hasil analisis dapat disimpulkan bahwa bendungan Tugu sebelum diberi perkuatan *grouting* termasuk ke dalam kategori tidak aman. Perkuatan pondasi bendungan dengan teknik injeksi semen/*grouting* memberikan pengaruh yang signifikan pada kestabilan bendungan, nilai angka keamanan berangsur meningkat setelah adanya perkuatan pada pondasi bendungan, dan kestabilan bendungan masuk dalam kategori aman.

Kata Kunci: Bendungan, Grouting, Stabilitas Bendungan, Faktor Keamanan, Plaxis v8.6, Bendungan Tugu.

Abstract

The Tugu Dam is located in Trenggalek, East Java. The dam is planned to have a large inundation area of 41.70 ha with an effective storage capacity of 7.80 x 10⁶ m³. Tugu Dam was built to be able to anticipate the floods that often hit the Trenggalek area that occurs routinely every year. With such large reservoirs of stored water it is necessary to anticipate fairly good and serious rock dam foundation rock, so that overall the dam is protected from leakage and collapse. This study aims to determine how the stability of the Tugu Dam foundation before and after the soil reinforcement is done with grouting techniques. The analysis was performed using manual calculations and simulation software Plaxis v.8.6. Reviewed in 3 (three) condition:., flood water level, low water level, and full water level. Based on the results of the analysis it can be concluded that the Tugu dam before being given grouting reinforcement falls into the unsafe category. Dam foundation reinforcement with cement injection/ grouting technique gives a significant effect on the stability of the dam, the value of the security number gradually increases after the reinforcement of the dam foundation, and the stability of the dam into the safe category.

Keywords: Dam, Grouting, Dam Stability, Safety Factor, Plaxis v8.6, Tugu Dam.

PENDAHULUAN

Kebocoran air waduk dapat terjadi pada batuan pondasi terutama apabila batuan tersebut banyak terdapat retakan-retakan yang menerus dari hulu kearah hilir. Untuk memperoleh pondasi yang memenuhi syarat, tanah/batuan harus digali sampai kedalaman tertentu dan dilakukan perkuatan tanah pondasi, sehingga pondasi mempunyai daya dukung, ketahanan terhadap rembesan dan deformasi yang diizinkan sesuai dengan persyaratan pada berbagai kondisi pembebanan (Pedoman Kriteria Umum Desain Bendungan, 2003). Sehubungan dengan hal tersebut peneliti ingin menganalisis bagaimana stabilitas bendungan tugu pada saat sebelum dan sesudah dilakukan perkuatan pondasi (*foundation treatment*).

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah Bagaimana perbandingan stabilitas bendungan Tugu sebelum dan sesudah dilakukan perkuatan tanah dengan Teknik *Grouting* ?.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui kondisi kestabilan bendungan sebelum dan sesudah dilakukan perkuatan tanah.

Manfaat penelitian ini diharapkan dapat memberikan suatu manfaat baik secara langsung maupun tidak langsung antara lain :

1. Dapat mengetahui perbandingan stabilitas bendungan sebelum dan sesudah dilakukan perkuatan tanah.
2. Selain itu penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat untuk menambah wawasan dan menangani berbagai aspek struktur geoteknik dan proses konstruksi dengan menggunakan komputasi.

Teori perhitungan stabilitas bendungan yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Teori Perhitungan *Safety Factor*

Analisis	<i>Safety Factor</i>	
Manual	$SF = \frac{\tau f}{\tau d}$	
	Gaya yang menggerakkan (τd): Gaya Seret Air (τ) $\tau = w \cdot h \cdot l$ Gaya Gempa (V) $V = \frac{SDs \times Ie}{R} \times$	Gaya yang menahan (τf): Kuat geser (τf) $\tau = c + \sigma \cdot tg\phi$
Software	<i>Metode Phi-C reduction</i>	

Dimana:

w = Berat air (1000kg/cm³)

h = Dalamnya air (m)

l = Gradien hidrolis dari sungai

c = Kohesi tanah (kN/m²)

σ = Tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m²)

ϕ = Sudut gesek dalam tanah (derajat)

SDs = Parameter percepatan respon spektrum desain dalam rentang periode pendek

Ie = Faktor keutamaan gempa

R = Faktor modifikasi respon

Tabel 2. Faktor Angka Keamanan Minimum Untuk Bendungan Tipe Urugan

Kondisi	SNI 8064:2016 Metode Analisis Stabilitas Statik Bendungan Tipe Urugan		Lambe dan Witman (1969), Sherad et al (1963)	
	Tanpa Gempa	Dengan Gempa	Tanpa Gempa	Dengan Gempa
<i>Low Water Level</i>	1,30	1,20	1,40	1,0
<i>Full Supply Level</i>	1,50	1,20	1,50	1,0
<i>Flood Water Level</i>	1,50	1,20	1,50	1,0

(Sumber: SNI 8064:2016 Metode Analisis Stabilitas Statik Bendungan Tipe Urugan dan Lambe dan Witman (1969), Sherad et al (1963) dalam Hardiyatmo (2014).

METODE

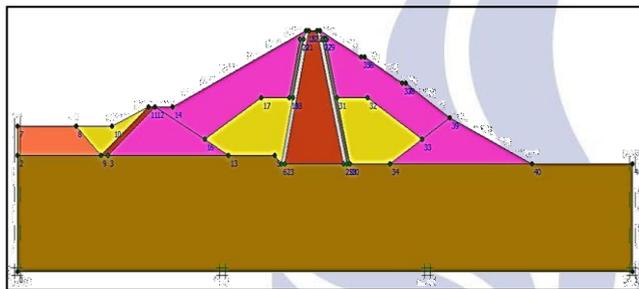
Penelitian ini bersifat eksperimental dengan melakukan simulasi menggunakan software. Metode yang digunakan yaitu metode kuantitatif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan injeksi semen (*grouting*) untuk perbaikan dan perkuatan tanah pondasi bendungan yang dilakukan dengan perhitungan manual dan menggunakan program *software Plaxis v8.6*.

Dalam penelitian ini digunakan data sekunder yang diperoleh dari proyek yang bersangkutan. Data yang diperlukan adalah data dimensi bendungan dan data tanah bendungan. Data tanah yang digunakan adalah data tanah asli pada pondasi bendungan yang meliputi jenis tanah beserta parameternya dan data tanah untuk material timbunan.

Tabel 3. Rekapitulasi Data Parameter Tanah Timbunan dan Pondasi Bendungan Tugu

Parameter	Sat.	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6
		Clay	Filter Halus	Filter Kasar	Random	RipRap	Pondasi
Model Type		MC un drained	MC drained	MC drained	MC drained	MC drained	MC drained
γ_{sat}	(ton/m ³)	1.780	2.050	2.100	2.080	2.300	2.200
γ_{dry}	(ton/m ³)	1.680	1.800	1.850	1.850	2.100	2.150
E	(kN/m ²)	20.000	75.000	100.000	60.000	150.000	800.000
c	(ton/m ²)	2.4	0.0	0.0	1.0	0.0	20.0
ϕ	°	17.5	30	32	28	42	37
v		0.40	0.35	0.35	0.37	0.33	0.30
ψ	°	0	0	0	0	0	0
kv	(cm/dt)	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-3}	5.0×10^{-3}	1.0×10^{-4}	Free drain	1.0×10^{-4}
kh	(cm/dt)	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-3}	2.5×10^{-2}	5.0×10^{-4}	Free drain	1.0×10^{-4}

(Sumber: Pek. Supervisi Kontruksi Bendungan Tugu,2016)

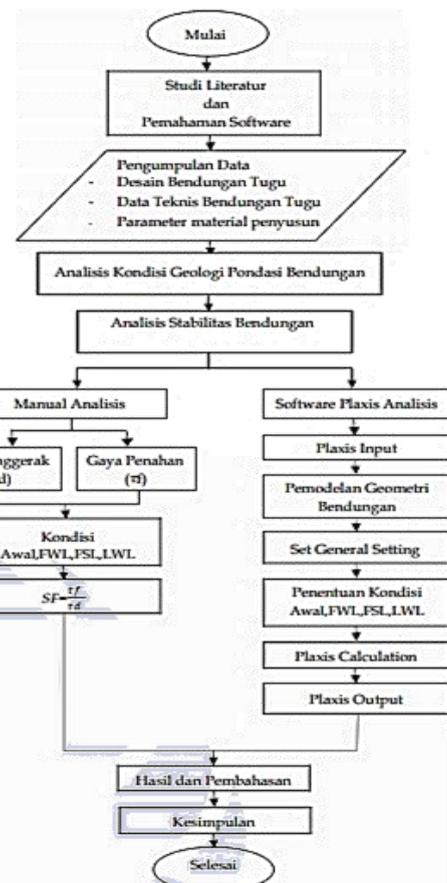


Gambar 1. Model Bendungan
(Sumber: Dokumen Pribadi)

Data parameter grouting yang digunakan berdasarkan “Pedoman Grouting Pada Bendungan” oleh Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Sungai dan Waduk. Adapun jenis-jenis Grouting yang digunakan dalam penelitian simulasi ini adalah *Grouting Tirai*, *Grouting Selimut*, *Grouting Konsolidasi*.

Komposisi campuran material grouting yang digunakan yaitu *SikatGrout 215new* sesuai dengan spesifikasi teknis atau katalog nilai adhesi yang dihasilkan oleh semen grouting sebesar 1.5 N/mm² atau setara dengan 15 Kg/cm² di input kedalam software *Plaxis v8.6*. Tipe material grouting adalah non porus, dimana γ_{sat} dan nilai permeabilitas menjadi nol.

Alur kegiatan penelitian yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 2. Diagram Alir Rancangan Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Perhitungan Manual Stabilitas Bendungan

1. Analisis Kondisi Geologi Pondasi Bendungan
 - a. Menentukan Klasifikasi Masa Batuan dengan Rock Quality Designation (RQD) dan Hasil Water Pressure Test (WPT)

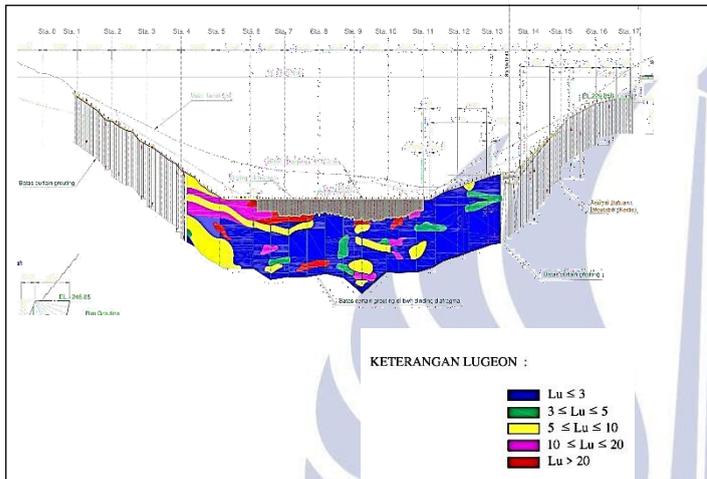
Investigasi geologi yang dilakukan pada pondasi bendungan Tugu dibagi 3 (Tiga), yaitu sandaran kanan (right bank), dasar sungai (riverbed), dan sandaran kiri (left bank). Berdasarkan penelitian (Yahya, 2018) hasil survey investigasi geologi yang diperoleh setelah melakukan logging bor pada ketiga wilayah tersebut adalah

- 1) Sandaran kanan (Right Bank)
Rata – rata nilai RQD = 34.17 %
- 2) Dasar sungai (Riverbed)
Rata – rata nilai RQD = 49.26 %
- 3) Sandaran kiri (Left Bank)
Rata – rata nilai RQD = 49.91 %

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil *Rock Quality Designation* dan Hasil *Water Pressure Test*

Bagian	RQD (%)	Keterangan
<i>Right Bank</i>	34,17	Buruk
<i>Riverbed</i>	49,26	Buruk
<i>Left Bank</i>	49,91	Sedang

Dikarenakan nilai Lugeon > 1, nilai RQD < 70%, dan kualitas batuan yang rendah, maka diperlukan perbaikan atau perkuatan pondasi. (Anonim, 2005: 13).



Gambar 3. Mapping Nilai *Lugeon*
(Sumber: Laporan Pek. Grouting Bendungan Tugu)

b. Perhitungan Tegangan Vertikal Pondasi
Perhitungan tegangan vertikal yang terjadi dibawah pondasi Bendungan Tugu dilakukan perhitungan tiap kedalaman pondasi dari kedalaman $z = 0-15$ m dari dasar tubuh bendungan.

$$H = 81,00 \text{ m (Main dam)}$$

$$24,75 \text{ m (Coffer dam)}$$

$$\gamma_{\text{sat}} = 2,3 \text{ ton/m}^3 = 22,56 \text{ kN/m}^3$$

- Main dam
 $q = H \times \gamma_{\text{sat}}$
 $q = 81,00 \times 22,56 = 1827,36$
 kN/m^3

- Pengaruh Bagian Kanan ($z = 15$ m)

$$\frac{a}{z} = \frac{204,675}{15} = 13,645$$

$$\frac{b}{z} = \frac{6}{15} = 0,4$$

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{\pi} x \left[\frac{a+b}{a} x \alpha_1 + \alpha_2 \right] - \frac{b\alpha}{a^2}$$

$$I_1 = \frac{1}{3,14} x \left[\frac{204,675 + 6}{204,675} x (1,5 + 0,07) - \frac{6}{204,675} \times 0,07 \right]$$

$$I_1 = 0,513$$

- Pengaruh Bagian Kiri ($z = 15$ m)

$$\frac{a}{z} = \frac{209,330}{15} = 13,955$$

$$\frac{b}{z} = \frac{6}{15} = 0,513$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{\pi} x \left[\frac{a+b}{a} x \alpha_1 + \alpha_2 \right] - \frac{b\alpha}{a^2}$$

$$I_2 = \frac{1}{3,14} x \left[\frac{209,330 + 6}{209,330} x (1,48 + 0,07) - \frac{6}{209,330} \times 0,07 \right]$$

$$I_2 = 0,506$$

$$\sigma z = (I_1 + I_2) \times q$$

$$\sigma z = (0,513 + 0,506) \times 1827,36 \text{ kN/m}^3$$

$$\sigma z = 1860,9439 \text{ kN/m}^3 < 1000 - 5000 \text{ kN/m}^3$$

Tabel 5. Rekapitulasi Perhitungan Tegangan Vertikal Pondasi (Main dam)

z (m)	I ₁	I ₂	σz (kN/m ³)
0	0.523	0.516	1897.524
5	0.519	0.512	1882.671
10	0.517	0.510	1875.685
15	0.513	0.506	1860.944
20	0.262	0.506	1403.090
25	0.346	0.504	1552.221
30	0.397	0.501	1641.780
35	0.440	0.500	1716.404
40	0.450	0.499	1733.975

Sumber: Hasil Perhitungan, 2020.

Bedasarkan tabel kelas batuan yang dikeluarkan oleh central research institute of electric power industry japan, apabila hasil nilai $q_u = 1000 - 5000$ kN/m² akibat beban yang bekerja dari tubuh bendungan maka batuan pondasi bendungan dianggap memenuhi sebagai tumpuan. Sedangkan hasil perhitungan tegangan vertikal (*Main dam*) didapatkan nilai q_u sebesar 1897,524 kN/m³, maka pondasi bendungan dianggap memenuhi.

2. Faktor Yang Berperan Dalam Kestabilan Bendungan

a. Perhitungan Gaya Seret Air

Berikut perhitungan gaya seret air sesuai dengan rumus yang dijelaskan dalam buku (Sosrodrsono,2003).

- Pada Kondisi Muka Air Normal

$$\tau = w \times h \times l$$

$$\tau = 1000 \times 239,05 \times 1.246.10^{-01}$$

$$\tau = 29871.6 \text{ (Kg/m}^2\text{)}$$

- Pada Kondisi Muka Air Normal

$$\tau = w \times h \times I$$

$$\tau = 1000 \times 202,35 \times 1.246.10^{-01}$$

$$\tau = 25209.4 \text{ (Kg/m}^2\text{)}$$

- Pada Kondisi Muka Air Normal

$$\tau = w \times h \times I$$

$$\tau = 1000 \times 239,05 \times 1.236.10^{-01}$$

$$\tau = 30339.7 \text{ (Kg/m}^2\text{)}$$

Tabel 6. Perhitungan Gaya Seret Air

Kondisi	w (Kg/ cm ³)	h (m)	h1 (m)	h2 (m)	L (m)	I
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)=(2)-(3)/(4)
MAN	1000	239.05	261.16	249.58	92.950	1.246E-01
MAR	1000	202.35	261.16	249.58	92.950	1.246E-01
MAB	1000	243.53	261.16	249.58	92.950	1.246E-01

(Sumber. Hasil Perhitungan,2020)

b. Perhitungan Gaya Geser Bendungan

Berikut perhitungan gaya geser menurut Coulomb (1776).

- Pada Zona Random Tanah

$$\tau = c + \sigma \text{ tg}\phi$$

$$\tau = 0.1 + 6.826 \times 0.532$$

$$\tau = 3.731 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$$

- Pada Zona Pondasi Sebelum *Grouting*

$$\tau = c + \sigma \text{ tg}\phi$$

$$\tau = 0.2 + 7.478 \times 0.754$$

$$\tau = 5.835 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$$

- Pada Zona Pondasi Sesudah *Grouting*

$$\tau = c + \sigma \text{ tg}\phi$$

$$\tau = 15.2 + 8.478 \times 1.754$$

$$\tau = 30.246 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$$

Tabel 7. Perhitungan Kuat Geser Bendungan

Zona (Material)	c'	σ	$\tan\theta'$	Tf
	(1)	(2)	(3)	(4)
				=(1)+((2)x(3))
Random Tanah	0.1	6.826	0.532	3.731
Pondasi (NoGrout)	0.2	7.478	0.754	5.835
Pondasi (Grout)	15.2	8.478	1.754	30.246

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2020)

c. Perhitungan Gaya Gempa

Bedasarkan SNI-1726-2012 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung.

$$PGA = 1$$

$$S_s = 1$$

$$S_1 = 0.4$$

$$F_A = 1$$

$$F_v = 1$$

$$S_{MS} = S_s \times F_A$$

$$= 1 \times 1 = 1$$

$$S_{M1} = S_1 \times F_v$$

$$= 0.4 \times 1 = 0.4$$

$$S_{DS} = 2/3 \times S_{MS}$$

$$= 0.6667$$

$$S_{D1} = 2/3 \times S_{M1}$$

$$= 0.2667$$

$$T_0 = 0.2 \times (S_{D1} / S_{DS})$$

$$= 0.08$$

$$T_S = (S_{D1} / S_{DS})$$

$$= 0.4$$

$$I_e = 1.25 \text{ (Kategori Risiko III)}$$

$$R = \text{Elastis Penuh } (\mu = 1 ; f_l = 1,6) = \mu$$

$$f_l = 1 \times 1,6 = 1,6$$

$$W = 449783.628 \text{ Kg/m}^2$$

$$V = \frac{S_{DS} \times I_e}{R} \times W$$

$$V = \frac{0.6667 \times 1.25}{R} \times W$$

$$V = 149927.8761 \text{ Kg/m}^2$$

$$= 14.99278761 \text{ Kg/cm}^2$$

Dalam asumsi perhitungan grouting, material semen yang digunakan untuk injeksi semen (Grouting) adalah produk SikaGrout 215 (*new*) yang diproduksi oleh PT. Sika Indonesia. Berdasarkan informasi produk bahwa nilai kekuatan adhesi yang dihasilkan beton selama 28 hari adalah sebesar 1.5 N/mm² atau setara dengan

15 Kg/cm². Pekerjaan grouting dapat meningkatkan nilai kekuatan saling mengikat antara butir tanah dengan injeksi semen yang diberikan. Pada saat belum diberi perkuatan grouting, nilai kohesi adalah sebesar 0,200 Kg/cm², kemudian setelah diberi perkuatan menjadi meningkat sebesar 15,200 Kg/cm² . Sehingga, daya dukung tanah berupa gaya geser dalam tanah meningkat setelah diberikan perilaku grouting.

Tabel 8. Rekapitulasi Nilai SF Perhitungan

Kondisi	SF Minimum (SNI 8064:2016)		SF Tanpa Grouting		SF Grouting	
	Tanpa Gempa	Dengan Gempa	Tanpa Gempa	Dengan Gempa	Tanpa Gempa	Dengan Gempa
	MAN	1.5	1.2	0.870	0.269	4.812
MAR	1.3	1.2	0.933	0.275	5.164	1.520
MAB	1.5	1.	0.862	0.268	4.772	1.484

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2020)

Tabel 8. di atas merupakan tabel hasil perhitungan nilai *Safety Factor* dengan perhitungan Manual. Pada umumnya, faktor keamanan atau stabilitas lereng lebih besar atau sama dengan 1,2-1,5 (Hardiyatmo, 2010). Dari tabel nilai *Safety Factor* diatas dapat dilihat juga bahwa nilai *Safety Factor* lebih besar atau sama dengan ($SF \geq 1,5$), dimana hal ini menunjukkan bahwa bendungan aman dengan dipengaruhi gaya gempa.

Dapat dilihat dari hasil perhitungan, terdapat peningkatan nilai SF bendungan dari kondisi sebelum diberi perkuatan grouting dan sesudah diberi perkuatan grouting. Nilai SF bendungan tersebut meningkat dari sebelum dipasang perkuatan. Dimana sebelum di beri perkuatan nilai faktor keamanan hanya mencapai 0,862 pada kondisi banjir atau Full Water Level tidak dipengaruhi gaya gempa dan meningkat menjadi 4.772 setelah diberi perkuatan. Sedangkan dipengaruhi oleh gaya gempa hanya mencapai 0.268 dan meningkat menjadi 1.484. Untuk kondisi normal atau Flood Water Level nilai faktor keamanan hanya mencapai 0,870 tidak dipengaruhi gaya gempa dan meningkat menjadi 4.812 setelah diberi perkuatan. Sedangkan dipengaruhi oleh gaya gempa hanya mencapai 0.269 dan meningkat menjadi 1.488. Kemudian untuk kondisi rendah atau Low Water Level nilai faktor keamanan hanya mencapai 0,933 tidak dipengaruhi gaya gempa dan meningkat menjadi 5.164 setelah diberi

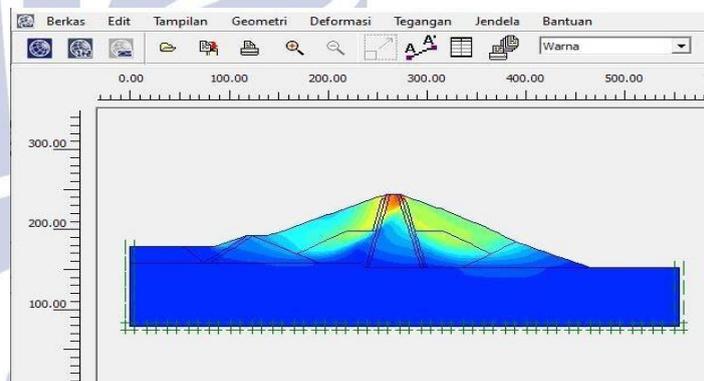
perkuatan. Sedangkan dipengaruhi oleh gaya gempa hanya mencapai 0.275 dan meningkat menjadi 1.520 . Berdasarkan persyaratan nilai faktor keamanan menurut RSI M-03-2002 dan Lambe, 1969; Sherard et al.,1963, kondisi FWL dengan dipengaruhi gaya gempa harus mencapai $SF = 1,0 - 1,2$, dari hasil perhitungan telah memenuhi persyaratan nilai faktor keamanan.

Simulasi Analisis Stabilitas bendungan Tugu dengan Software Plaxis v8.6.

1. Kondisi Sebelum Perkuatan dan Perbaikan Pondasi (Tanpa Grouting) Tanpa Gempa

a. Kondisi Muka Air Normal (Flood Water Level)

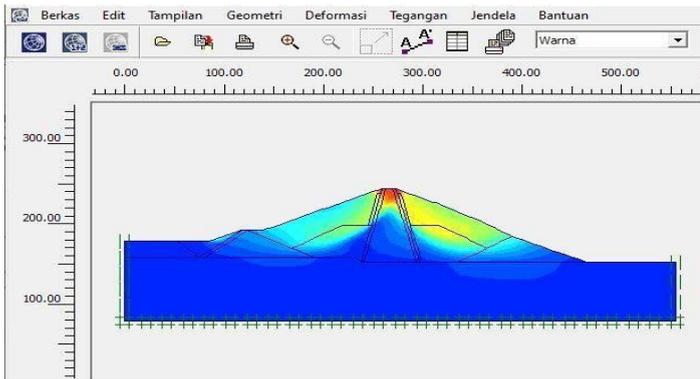
Pada simulasi pemodelan dalam kondisi muka air tanah normal (+239.5 m), gaya-gaya yang bekerja adalah akibat berat timbunan dan tekanan air pada tampungan muka air normal. Setelah dilakukan perhitungan dengan Plaxis v8.6 didapat hasil angka keamanan $\sum -Msf = 1.129$.



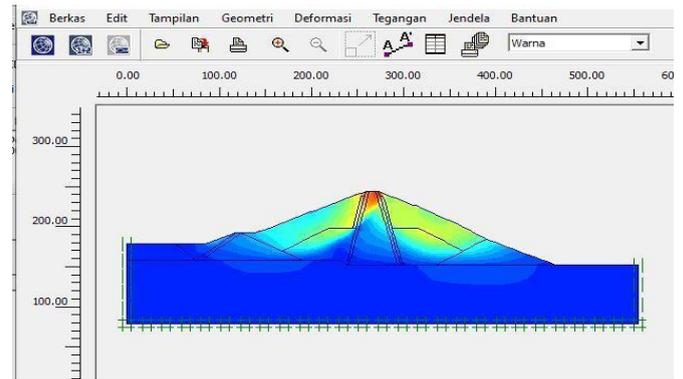
Gambar 4. Kondisi Muka Air Normal +239.05 m Tanpa Gempa Sebelum Grouting

b. Kondisi Muka Air Rendah (Low Water Level)

Pada simulasi pemodelan dalam kondisi muka air tanah rendah (+202.35 m), gaya-gaya yang bekerja adalah akibat berat timbunan dan tekanan air pada tampungan muka air banjir. Setelah dilakukan perhitungan dengan Plaxis v8.6 didapat hasil angka keamanan $\sum -Msf = 1.137$.



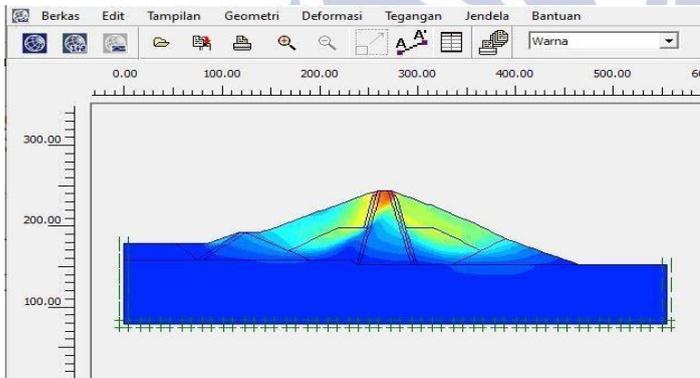
Gambar 5. Kondisi Muka Air Rendah +202.35 m Tanpa Gempa Sebelum *Grouting*



Gambar 7. Kondisi Muka Air Normal +239.05 m Dengan Gempa Sebelum *Grouting*

c. Kondisi Muka Air Banjir (Full Supply Level)

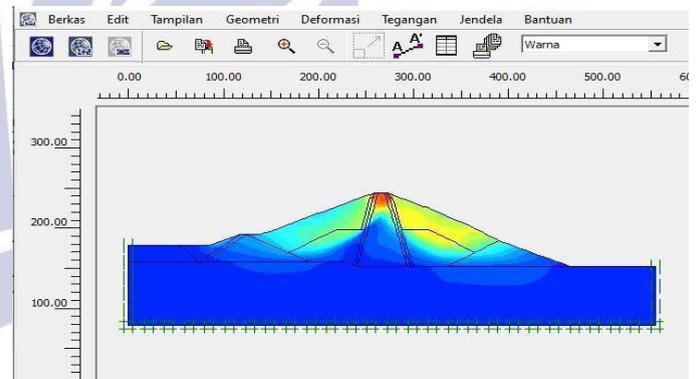
Pada simulasi pemodelan dalam kondisi muka air tanah banjir (+243.53 m), gaya-gaya yang bekerja adalah akibat berat timbunan dan tekanan air pada tumpungan muka air banjir. Setelah dilakukan perhitungan dengan Plaxis v8.6 didapat hasil angka keamanan $\Sigma -Msf = 1.126$.



Gambar 6. Kondisi Muka Air Banjir +243.53 m Tanpa Gempa Sebelum *Grouting*

b. Kondisi Muka Air Rendah (Low Water Level)

Pada simulasi pemodelan dalam kondisi muka air tanah rendah (+202.35 m), gaya-gaya yang bekerja adalah akibat berat timbunan, tekanan air pada tumpungan muka air banjir dan gaya gempa. Setelah dilakukan perhitungan dengan Plaxis v8.6 didapat hasil angka keamanan $\Sigma -Msf = 1.061$.



Gambar 8. Kondisi Muka Air Rendah + 202.35 m Dengan Gempa Sebelum *Grouting*

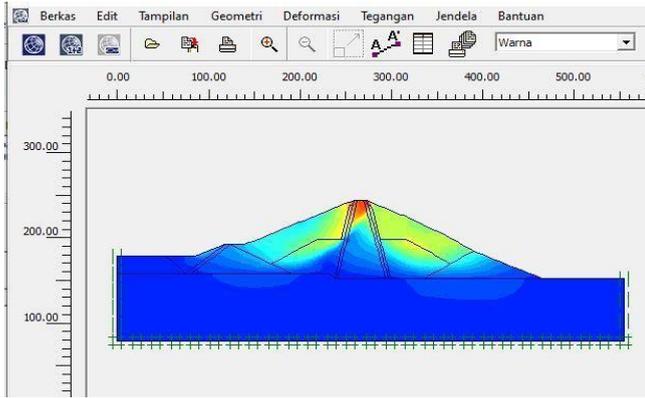
2. Kondisi Sebelum Perkuatan dan Perbaikan Pondasi (Tanpa *Grouting*) Dengan Gempa.

a. Kondisi Muka Air Normal (Flood Water Level)

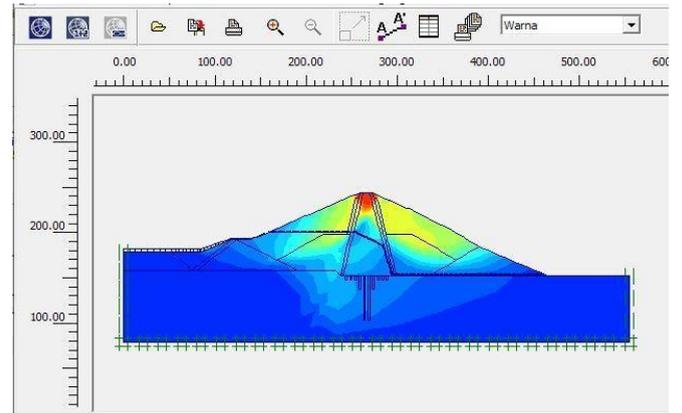
Pada simulasi pemodelan dalam kondisi muka air tanah normal (+239.5 m), gaya-gaya yang bekerja adalah akibat berat timbunan, tekanan air pada tumpungan muka air normal dan gaya gempa. Setelah dilakukan perhitungan dengan Plaxis v8.6 didapat hasil angka keamanan $\Sigma -Msf = 1.058$.

c. Kondisi Muka Air Banjir (Full Supply Level)

Pada simulasi pemodelan dalam kondisi muka air tanah banjir (+243.53 m), gaya-gaya yang bekerja adalah akibat berat timbunan, tekanan air pada tumpungan muka air banjir, dan gaya gempa. Setelah dilakukan perhitungan dengan Plaxis v8.6 didapat hasil angka keamanan $\Sigma -Msf = 1.056$.



Gambar 9. Kondisi Muka Air Banjir +243.53 m Dengan Gempa Sebelum *Grouting*

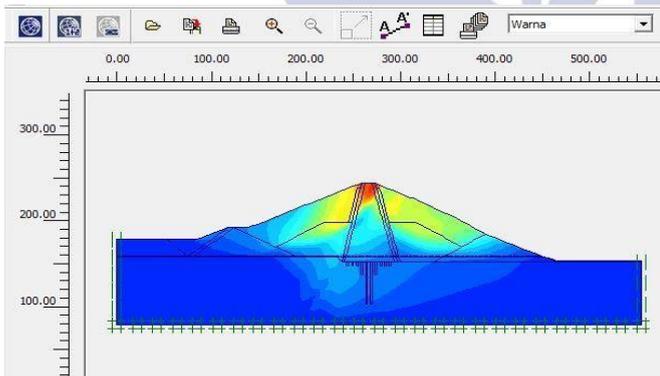


Gambar 11. Kondisi Muka Air Rendah + 202.35 m Tanpa Gempa Setelah *Grouting*

3. Kondisi Setelah Perkuatan dan Perbaikan Pondasi (Dengan *Grouting*) Tanpa Gempa

a. Kondisi Muka Air Normal (*Flood Water Level*)

Pada simulasi pemodelan dalam kondisi muka air tanah normal (+239.5 m), gaya-gaya yang bekerja adalah akibat berat timbunan dan tekanan air pada tumpangan muka air normal. Setelah dilakukan perhitungan dengan Plaxis v8.6 didapat hasil angka keamanan $\Sigma -Msf = 1.720$.



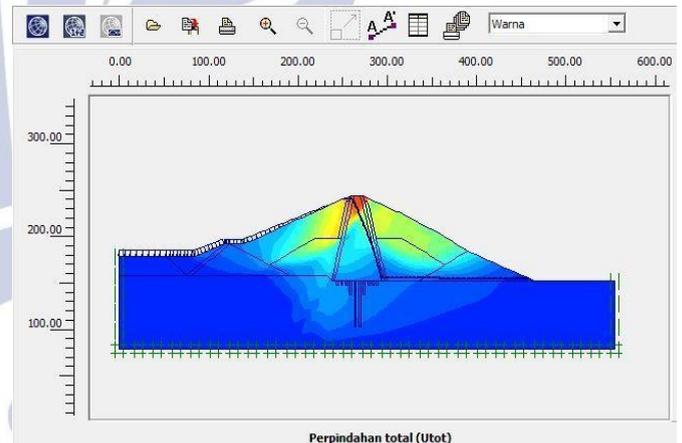
Gambar 10. Kondisi Muka Air Normal +239.05 m Tanpa Gempa Setelah *Grouting*

b. Kondisi Muka Air Rendah (*Low Water Level*)

Pada simulasi pemodelan dalam kondisi muka air tanah rendah (+202.35 m), gaya-gaya yang bekerja adalah akibat berat timbunan dan tekanan air pada tumpangan muka air banjir. Setelah dilakukan perhitungan dengan Plaxis v8.6 didapat hasil angka keamanan $\Sigma -Msf = 1.731$.

c. Kondisi Muka Air Banjir (*Full Supply Level*)

Pada simulasi pemodelan dalam kondisi muka air tanah banjir (+243.53 m), gaya-gaya yang bekerja adalah akibat berat timbunan dan tekanan air pada tumpangan muka air banjir. Setelah dilakukan perhitungan dengan Plaxis v8.6 didapat hasil angka keamanan $\Sigma -Msf = 1.717$.

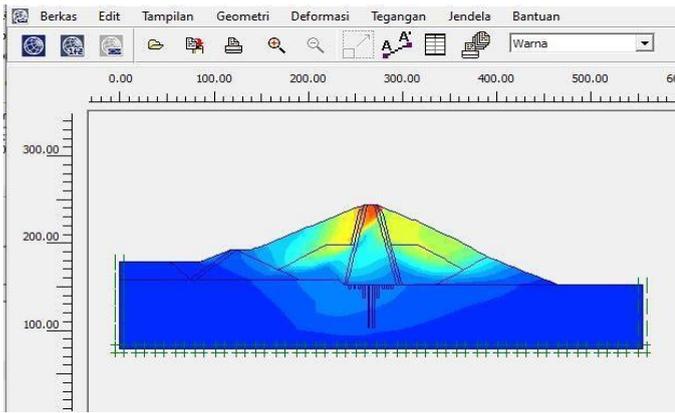


Gambar 12. *displacement* Kondisi Muka Air Banjir +243.53 m Tanpa Gempa Setelah *Grouting*

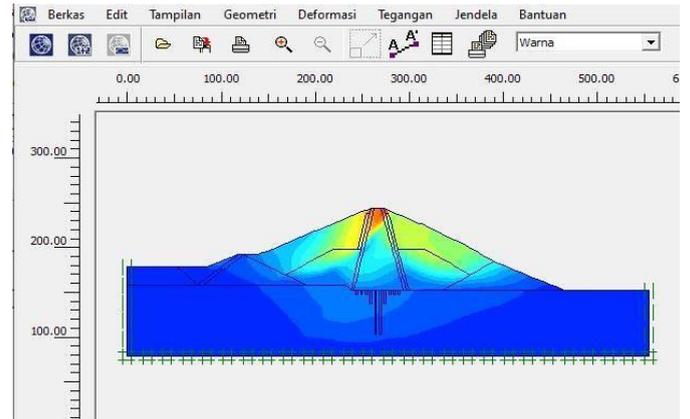
4. Kondisi Setelah Perkuatan dan Perbaikan Pondasi (Dengan *Grouting*) Dengan Gempa.

a. Kondisi Muka Air Normal (*Flood Water Level*)

Pada simulasi pemodelan dalam kondisi muka air tanah normal (+239.5 m), gaya-gaya yang bekerja adalah akibat berat timbunan, tekanan air pada tumpangan muka air normal dan gaya gempa. Setelah dilakukan perhitungan dengan Plaxis v8.6 didapat hasil angka keamanan $\Sigma -Msf = 1.680$.



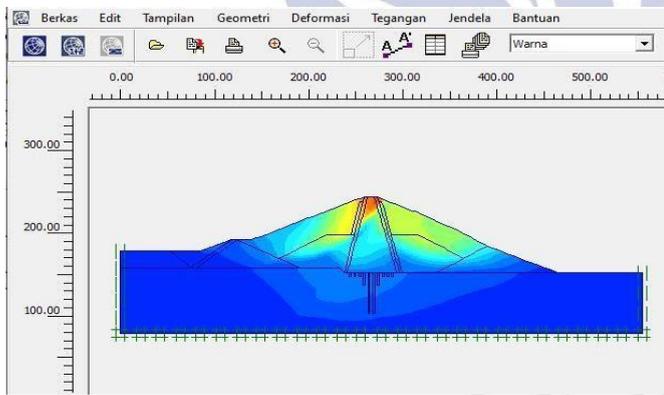
Gambar 13. Kondisi Muka Air Normal +239.05 m Dengan Gempa Sesudah *Grouting*



Gambar 15. Kondisi Muka Air Banjir +243.53 m Dengan Gempa Sesudah *Grouting*

b. Kondisi Muka Air Rendah (Low Water Level)

Pada simulasi pemodelan dalam kondisi muka air tanah rendah (+202.35 m), gaya-gaya yang bekerja adalah akibat berat timbunan, tekanan air pada tumpukan muka air banjir dan gaya gempa. Setelah dilakukan perhitungan dengan Plaxis v8.6 didapat hasil angka keamanan $\sum -Msf = 1.712$.



Gambar 14. Kondisi Muka Air Rendah + 202.35 m Dengan Gempa Sesudah *Grouting*

c. Kondisi Muka Air Banjir (Full Supply Level)

Pada simulasi pemodelan dalam kondisi muka air tanah banjir (+243.53 m), gaya-gaya yang bekerja adalah akibat berat timbunan, tekanan air pada tumpukan muka air banjir, dan gaya gempa. Setelah dilakukan perhitungan dengan Plaxis v8.6 didapat hasil angka keamanan $\sum -Msf = 1.676$.

Tabel 8. Rekapitulasi nilai *Safety Factor* simulasi software *Plaxis v.8.2*

Kondisi	SF Minimum (SNI 8064:2016)		SF Tanpa Grouting		SF Grouting	
	Tanpa Gempa	Dengan Gempa	Tanpa Gempa	Dengan Gempa	Tanpa Gempa	Dengan Gempa
MAN	1.5	1.2	1.129	1.058	1.720	1.680
MAR	1.3	1.2	1.137	1.061	1.731	1.712
MAB	1.5	1.	1.126	1.056	1.717	1.676

(Sumber: Hasil Simulasi Software)

Tabel 4.12. di atas merupakan tabel hasil perhitungan nilai *Safety Factor* dengan simulasi software *Plaxis v8.6*. Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa nilai *Safety Factor* pada saat kondisi bendungan tanpa diberi perkuatan *grouting* nilai *Safety Factor* cenderung lebih kecil daripada yang sudah diberi perkuatan *grouting*. Pada saat diberi perkuatan *grouting* hasil nilai *Safety Factor* lebih besar atau sama dengan ($SF \geq 1,5$), dimana hal ini menunjukkan bahwa bendungan dapat dikatakan aman pada saat dipengaruhi gaya gempa dan tanpa dipengaruhi oleh gaya gempa, disini menunjukkan bahwa perkuatan dengan teknik *grouting* dapat memberikan tambahan kekuatan pada suatu bendungan.

Dalam simulasi software *Plaxis v8.6*, perhitungan nilai *Safety Factor* dilakukan dengan menggunakan metode *Phi-c Reduction*. Prosedur *Phi-c Reduction* ini tidak perlu asumsi mengenai posisi penurunan dan keruntuhan pada batuan. Maka dari itu, bidang keruntuhan akan terbentuk secara otomatis pada zona keruntuhan dimana hal tersebut menggambarkan bahwa kekuatan tanah atau batuan tersebut tidak dapat menahan tegangan geser lagi.

Dalam penelitian (Febriana,2018), pengaruh gaya gempa turut andil dalam mempengaruhi besar kecilnya suatu nilai keamanan lereng bendungan. Dengan dibuktikan bahwa nilai SF menjadi lebih kecil ketika konstruksi bendungan tersebut diberikan beban gempa. Adanya pembebanan gempa memiliki pengaruh dengan peningkatan nilai gaya dorong atau momen dorong bidang longsoran suatu lereng. Meningkatnya kemampuan gaya dorong atau momen dorong diikuti dengan menurunnya faktor keamanan bidang longsoran lereng tersebut. Karena gaya dorong memiliki hubungan terbalik dengan faktor keamanan, jadi dapat disimpulkan bahwa adanya penambahan beban gempa akan mengurangi nilai faktor keamanan suatu lereng.

Selain itu, kondisi tinggi muka air tanah juga sangat berpengaruh terhadap kestabilan bendungan. Dapat dilihat pada gambar hasil output simulasi perubahan nilai *Safety Factor* bendungan berdasarkan kondisi muka airnya. Terlihat bahwa nilai *Safety Factor* meningkat sesuai dengan tinggi muka air tanahnya, semakin tinggi muka air maka kemampuan gaya dorong dari air tersebut meningkat yang tentu berdampak pada menurunnya faktor keamanan tersebut, karena adanya hubungan berbanding terbalik antara keduanya.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis stabilitas bendungan pada sta. 9+50 m tubuh Bendungan Tugu di Kabupaten Trenggalek dengan perkuatan menggunakan injeksi semen atau grouting. Diperoleh hasil perhitungan stabilitas bendungan secara perhitungan manual dan menggunakan simulasi software Plaxis 8.2 dilihat dalam berbagai kondisi yang dialami dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Hasil analisis stabilitas bendungan secara perhitungan manual tanpa diberi perkuatan grouting pada pondasi bendungan, menunjukkan nilai faktor kemanan yang angka keamanan yang sama-sama tidak aman tanpa dipengaruhi gaya gempa maupun dipengaruhi gaya gempa. Setelah diberi perkuatan pondasi berupa

grouting, dalam kondisi muka air normal nilai faktor keamanan tanpa gaya gempa meningkat dari 0.870 menjadi 4.812 dan pada saat diberi gaya gempa nilai keamanan dari 0.269 menjadi 1.488. Dalam kondisi muka air rendah nilai faktor keamanan tanpa gaya gempa meningkat dari 0.933 menjadi 5.164 dan pada saat diberi gaya gempa nilai keamanan dari 0.275 menjadi 1.520. Sedangkan dalam kondisi muka air banjir nilai faktor keamanan tanpa gaya gempa meningkat dari 0.862 menjadi 4.772 dan pada saat diberi gaya gempa nilai keamanan dari 0.268 menjadi 1.484.

2. Hasil analisis stabilitas bendungan dengan simulasi menggunakan *software Plaxis v8.6*. tanpa diberi perkuatan grouting pada pondasi bendungan, menunjukkan nilai faktor kemanan yang angka keamanan yang sama-sama tidak aman tanpa dipengaruhi gaya gempa maupun dipengaruhi gaya gempa. Setelah diberi perkuatan pondasi berupa grouting, dalam kondisi muka air normal nilai faktor keamanan tanpa gaya gempa meningkat dari 1.129 menjadi 1.720 dan pada saat diberi gaya gempa nilai keamanan dari 1.058 menjadi 1.680. Dalam kondisi muka air rendah nilai faktor keamanan tanpa gaya gempa meningkat dari 1.137 menjadi 1.731 dan pada saat diberi gaya gempa nilai keamanan dari 1.061 menjadi 1.712. Sedangkan dalam kondisi muka air banjir nilai faktor keamanan tanpa gaya gempa meningkat dari 1.126 menjadi 1.717 dan pada saat diberi gaya gempa nilai keamanan dari 1.056 menjadi 1.676.
3. Perkuatan pondasi bendungan dengan teknik injeksi semen/grouting memberikan pengaruh yang signifikan pada pada kestabilan bendungan. Nilai *safety factor* berangsur meningkat setelah adanya perkuatan pada pondasi bendungan, dan kestabilan bendungan masuk dalam kategori aman. Dapat dibuktikan dengan presentase peningkatan nilai *Safety Factor* sebesar 245.788% pada perhitungan manual tanpa gaya

gempa dan 245.851% pada perhitungan manual dengan gaya gempa. Sedangkan presentase peningkatan nilai *Safety Factor* sebesar 103.906 % pada perhitungan simulasi *software Plaxis* tanpa gaya gempa dan 112.042% dengan gaya gempa.

UCAPAN TERIMAKASIH

1. Bapak Mochamad Firmansyah Sofianto, S.T., M.Sc., M.T. selaku Pembimbing/Dosen Penguji 2;
2. Bapak Arie Wardhono, ST, M.MT., MT, Ph.D. selaku Ketua Penguji
3. Bapak Yogie Risdianto, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji 1;

DAFTAR PUSTAKA

- Brinkgreve, R.B.J. 2007. *PLAXIS 2D Versi 8*. Delf University of Technology & PLAXIS b.v: Belanda.
- Das, B.M. 1995. Edisi Kedua. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik) Jilid I*. Jakarta: Erlangga.
- Eko, Yahya. 2018. *Kajian Perbaikan Pondasi Kombinasi Plastic Concrete Cut Off Wall dan Grouting Pada Pembangunan Bendungan Tugu Kabupaten Trenggalek*. Malang: Universitas Brawijaya.
- E.J. Sesty. dan O. B. A. Sompie. 2013. *Analisa Konsolidasi Dan Kestabilan Lereng Bendung Kosinggolan*. Manado: Universitas Sam Ratulangi.
- Febriana, Keke. 2018. *Optimasi Pemasangan Grouting Pada Bendungan Pandanduri Yang Dipengaruhi Gaya Gempa*. Mataram: Universitas Mataram.
- Hanif, F.R. 2014. *Evaluasi Keamanan Tubuh Bendungan Prijetan Menggunakan Aplikasi Plaxis 8.2*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Hardiyatamo, Harry C. 2010. *Mekanika Tanah II*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Ilham, M. 2015. *Analisa Stabilitas Tubuh Bendungan Utama Tugu Trenggalek*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Imron, A. dan Sarah, D. 2017. *Analisa Geoteknik Bendungan Gongseng dengan Keamanan Rembesan, Stabilitas Lereng, dan Beban Gempa..* Semarang: Universitas Diponegoro.
- Kurniawan, Arifien Nursandah, dan Dio Alif Hutama. 2019. *Pengaruh Nilai Lugeon (Lv) Pada Test Grouting Proyek Pembangunan Waduk Gongseng Di Kabupaten Bojonegoro*. Surabaya: Universitas Muhammadiyah Surabaya.
- Liong, G.T. dan Herman D.J.G. 2012. *Analisa Stabilitas tubuhLimit Equilibrium vs Finite Element Method*. Jakarta: Universitas Bina Nusantara
- Masrevaniah, Aniek. 2010. *Konstruksi Bendungan Urugan I*. Malang: CV. Asrori Malang.
- Pangesti, D.R. 2005. *Pedoman Grouting Untuk Bendungan*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Direktorat Sungai dan Waduk.
- Putra, T.D. 2012. *Tinjauan Perilaku Massa Batuan Lunak Akibat Beban Bendungan Dilokasi PLTMH Kokok Babak Bedasarkan Konsep Pengurangan Keteguhan Phi-C Reduction*. Mataram: Universitas Mataram.
- RSNI 8064:2016. *Metode Analisis Stabilitas tubuhStatik Bendungan Tipe Urugan*. Badan Standarisasi Nasional Indonesia.
- RSNI T-01-:2002. *Tata Cara Desain Tubuh Bendungan Tipe Urugan*. Badan Standarisasi Nasional Indonesia.
- Simatupang, Andry. 2015. *Perbandingan Antara Metode Limit Equilibrium Dan Metode Finite Element Dalam Analisa Stabilitas Lereng*. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Soedibyo. 2003. Edisi Kedua. *Teknik Bendungan*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Sosrodarsono, DR. Suyono, dan Takeda. 2002. *Bendungan Tipe Urugan*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Sosrodarsono, DR. Suyono, dan Takeda. 2003. *Hidrologi Untuk Pengairan*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Subekti, Imam. 2017. *Geologi Teknik*. Yogyakarta: Teknosain.
- Sumirin, DR. 2017. *Analisa Efektivitas Model Perkuatan dengan Injeksi Semen untuk Peningkatan Angka Keamanan Lereng*. Semarang: Universitas Islam Sultan Agung
- Wedya, Ghea. 2014. *Analisa Stabilitas Tubuh Bendungan Lolak Kabupaten Bolaang Mongondow Sulawesi Utara*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Yakar, Murat. 2019. *Investigation Of Grouting Applications In Tarsus Pamukluk Dam*. Turkey: Mersin University.