

ANALISIS STABILITAS TUBUH BENDUNGAN PADA BENDUNGAN UTAMA PROYEK WADUK BENDO PONOROGO

¹Moch. Sholeh, ²Suhartono, ³Nur Anisfi Choirini

^{1,2,3}Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang

¹moch.sholeh@polinema.ac.id, ²tonohartono021@hotmail.com ³anisfi15july@gmail.com,

Abstract

The work of embankment in the main dam with an upright core consists of 5 pile zones: the core, filter, random, rock, and rip-rap. There was difference in planning and implementation of embankment filling. Random and rock used quarry Bondrang in planning but blasting upstream of the excavated material was used in implementation. This difference is because there are social problems with the community surrounding the Bondrang quarry. The purpose of this thesis is to repair the dam foundation, to find out the seepage discharge, to analyze the possibility of piping, to determine the safety factor of slope stability in the dam, and to determine RAB Maindam of Bendo Dam Project Ponorogo.

The required data were of the geologic of the dam foundation, embankment materials, cross-sectional images of the dam body, and dam technical. Repairing the foundation using 3 methods : curtain grouting, consolidated grouting and blanket grouting; and for seepage calculations using the Cassagrande formula; to calculate safety figures using the Fellenius method and use the Geo-Studio 2012 application, the Seep / W program to find out the seepage discharge and the Geo-slope program to find out slope stability in maindam.

The analysis resulted in 3 methods of repairing dam: curtain grouting with a depth of 39.83m, consolidated grouting with a depth of 5m, and blanket grouting with a depth of 15m; seepage discharge capacity <1% passing water average meaning safe; velocity seepage ($7,3816 \times 10^{-7}$ m/sec) < velocity critical (0,004017m/sec) and $11,97 > 4$ meaning safe for piping; >1.5 slope stability in various conditions without earthquake load meaning safe; 1.2 slope stability in various conditions with earthquake load meaning safe; the estimated cost IDR290,388,884,070.62 for main dam.

Keywords: dam stability, safety factor, safe

Pendahuluan

Bendungan Bendo merupakan bendungan yang terletak di Desa Bendo, Kecamatan Sawoo, Kabupaten Ponorogo, Provinsi Jawa Timur. Bendungan Bendo merupakan salah satu Program Strategis Nasional Pemerintah Presiden Joko Widodo. Pembangunan Waduk berguna untuk meningkatkan jumlah tampungan air di Indonesia. Bendungan Bendo direncanakan memiliki tampungan air sebesar 43 juta m³. Selain itu juga untuk mensuplai irigasi sawah-sawah seluas 7.800 hektar. Selain untuk irigasi Bendungan Bendo bermanfaat untuk pengendali banjir di Kabupaten Ponorogo dan kabupaten Madiun. Direncanakan bendungan ini memiliki tinggi 71 meter dan membendung sungai Keyang yang merupakan anak sungai Bengawan Madiun (anak sungai Bengawan Solo). (Sumber : liputan 6)

Bendungan Bendo merupakan bendungan urugan tipe zonal (inti tegak) dimana terdapat beberapa zona timbunan yang digunakan. Analisa desain zona-zona sangat diperhatikan. Besar ketebalan zona-zona sangat mempengaruhi besarnya angka rembesan dan nilai keamanan stabilitas bendungan. Maka dari itu perlu dianalisa zona-zona penyusun *maindam* seperti besarnya zona-zona penyusunnya. Terdapat perbedaan dalam pemakaian material timbunan random dan batu. Pada perencanaan digunakan *quarry* Bondrang untuk timbunan batu dan random dan pada pelaksanaan digunakan *quarry* dari material galian *maindam* dan *blasting* di area hulu bendungan dan material random digunakan dari galian *spillway*. *Quarry* Bondrang tidak boleh digunakan karena ada masalah sosial masyarakat sekitar.

Dengan memperhatikan latar belakang dan permasalahan tersebut diatas maka tujuan pembahasan ini meliputi:

1. Menganalisis kondisi pondasi Bendungan Bendo.
2. Menentukan debit rembesan pada tubuh Bendungan Bendo.
3. Menganalisis kemungkinan terjadi *piping* pada Bendungan Bendo.
4. Menentukan angka keamanan stabilitas lereng Bendungan Bendo.
5. Menghitung anggaran biaya pada *maindam* Bendungan Bendo.

Definisi Bendungan Urugan

Suatu bendungan yang dibangun dengan cara menimbunkan bahan-bahan seperti : batu, krakal, kerikil, pasir dan tanah pada komposisi tertentu dengan fungsi sebagai pengempang atau pengangkat permukaan air yang terdapat di dalam waduk di udiknya disebut bendungan tipe urugan atau “bendungan urugan”.

Bendungan Zonal Inti Tegak

Bendungan urugan digolongkan dalam tipe zonal, apabila timbunan yang membentuk tubuh bendungan terdiri dari batuan dengan gradasi (susunan ukuran butiran) yang berbeda-beda dalam urutan-urutan pelapisan tertentu. Pada bendungan tipe ini sebagai penyangga terutama dibebankan kepada timbunan yang lulus air (zona lulus air), sedang penaha rembesan dibebankan kepada timbunan yang kedap air (zona kedap air). 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 dan berkedudukan miring kearah hilir.

Pondasi Bendungan Urugan

Bendungan sebagai penampung air harus direncanakan dengan bahan pembentuk tubuh bendungan yang baik dan berdiri diatas pondasi yang stabil. Pondasi bendungan sebagai penopang tubuh bendungan harus memenuhi persyaratan tertentu. Namun, apabila pondasi bendungan tidak memenuhi persyaratan bisa dilakukan perbaikan pada pondasi sepanjang perbaikan tersebut layak dari segi teknis dan ekonomis. (Astuti, 2012) (dalam Masrevaniah, 2010)

Perbaikan Pondasi

Kegiatan untuk memperbaiki pondasi adalah dengan cara *grouting*. *Grouting* adalah

penyuntukan bahan perekat ke dalam material batuan dengan tekanan yang bertujuan menutup rongga – rongga dan rekahan sehingga meningkatkan kekuatan tanah. Perbaikan pondasi yang diperlukan adalah sebagai berikut :

1) Sementasi Tirai (*curtain grouting*)

Untuk menentukan kedalaman tirai sementasi, secara umum dapat digunakan rumus empiris, dapat digunakan Persamaan 1.

$$d = \frac{1}{3}h + c$$

(1)

Dengan :

d = kedalaman pengeboran (m)

h = tinggi tekanan statis air (m)

c = koefisien (8 s/d 20)

2) Sementasi Konsolidasi (*consolidation grouting*)

Jarak antar lubang bor biasanya 2,5 s/d 5 m dan kedalamannya berkisar antara 5 s/d 15 m. (Departemen Pekerjaan Umum, 2005 : 137)

3) Sementasi Selimut (*Blanket Grouting*)

Jarak antar lubang biasanya 2,5 s/d 5 m serta umumnya mempunyai kedalaman 5 s/d 15 m. (Departemen Pekerjaan Umum, 2005 : 137)

Rembesan Pada Tubuh Bendungan

Memperkirakan besarnya kapasitas filtrasi yang mengalir melalui tubuh dan pondasi bendungan yang didasarkan pada jaringan trayektori aliran filtrasi, dapat dihitung dengan Persamaan 2.

$$Qf = \frac{Nf}{Np} K.H.L$$

(2)

dengan =

Qf = kapasitas aliran filtrasi (kapasitas rembesan).

Nf = angka pembagi dari garis trayektori aliran filtrasi.

Np = angka pembagi dari garis *equi*-potensial.

K = koefisien filtrasi.

H = tinggi tekanan air total.

L = Panjang profil melintang tubuh bendungan.

Besarnya kecepatan filtrasi dapat diketahui dengan menggunakan jaringan trayektori aliran filtrasi atau menggunakan rumus-rumus empiris. (Sosrodarsono, 1977 : 169). Dengan menggunakan jaringan aliran filtrasi dapat

dihitung kecepatan filtrasi digunakan Persamaan 3, dan persamaan 4.

$$v = k \cdot i$$

(3)

$$v = k \cdot h_2 / l$$

(4)

dengan:

v = kecepatan aliran filtrasi (lereng hilir bendungan) (m/detik)

k = koefisien filtrasi (m/detik)

i = gradien debit

h_2 = tekanan air rata-rata (perbedaan antara tekanan pada titik masuknya air di hulu dan titik keluarnya air di hilir pada suatu garis trayektori aliran filtrasi) (m)

l = Panjang rata-rata berkas elemen aliran filtrasi pada bidang keluarnya aliran filtrasi (m)

Untuk mengetahui keamanan bendungan urugan tanah terhadap *piping* dapat dihitung berdasarkan Persamaan 5 dan persamaan 6.

$$FK = \frac{I_c}{I_e} \geq 4$$

(5)

$$I_c = \frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$

(6)

dengan :

FK = faktor keamanan (tanpa dimensi)

I_c = gradien keluaran kritis (tanpa dimensi)

I_e = gradien keluaran dari hasil analisa rembesan (tanpa dimensi)

γ = berat isi efektif (t/m^3)

γ_w = berat isi air (t/m^3)

G_s = berat spesifik (tanpa dimensi)

e = angka pori (tanpa dimensi)

Stabilitas Lereng Bendungan

Analisis stabilitas menggunakan perhitungan manual dengan metode *Fellenius* dapat digunakan persamaan 7. (Hardiyatmo, 2002:360)

$$F = \frac{\sum c_{ai} + (W_i \cos \theta_i - u_{ai}) \tan \phi}{\sum W_i \sin \theta_i}$$

(7)

dengan:

F = faktor aman

c = kohesi tanah (kN/m^2)

ϕ = sudut gesek dalam tanah (derajat)

a_i = Panjang lengkung lingkaran pada irisan ke-i (m)

W_i = berat irisan tanah ke-I (kN)

u_i = tekanan air pori pada irisan ke-i (kN/m^2)

θ_i = sudut yang terbentuk

Pada saat kondisi gempa dapat dihitung menggunakan koefisien gempa dengan Persamaan 8 dan percepatan gempa terkoreksi dengan Persamaan 9.

$$A_d = Z \times A_c \times v$$

(8)

$$k = \frac{A_d}{g}$$

(9)

dengan :

k = Koefisien gempa

A_d = Percepatan gempa terkoreksi (gal)

A_c = Percepatan gempa dasar (gal)

v = faktor koreksi pengaruh jenis tanah setempat

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/dt)

Z = Koefisien zona gempa berdasar peta zonasi gempa Wil. Indonesia

Perhitungan percepatan gempa terkoreksi menggunakan percepatan gempa dasar berbagai periode ulang pada **Tabel 2**.

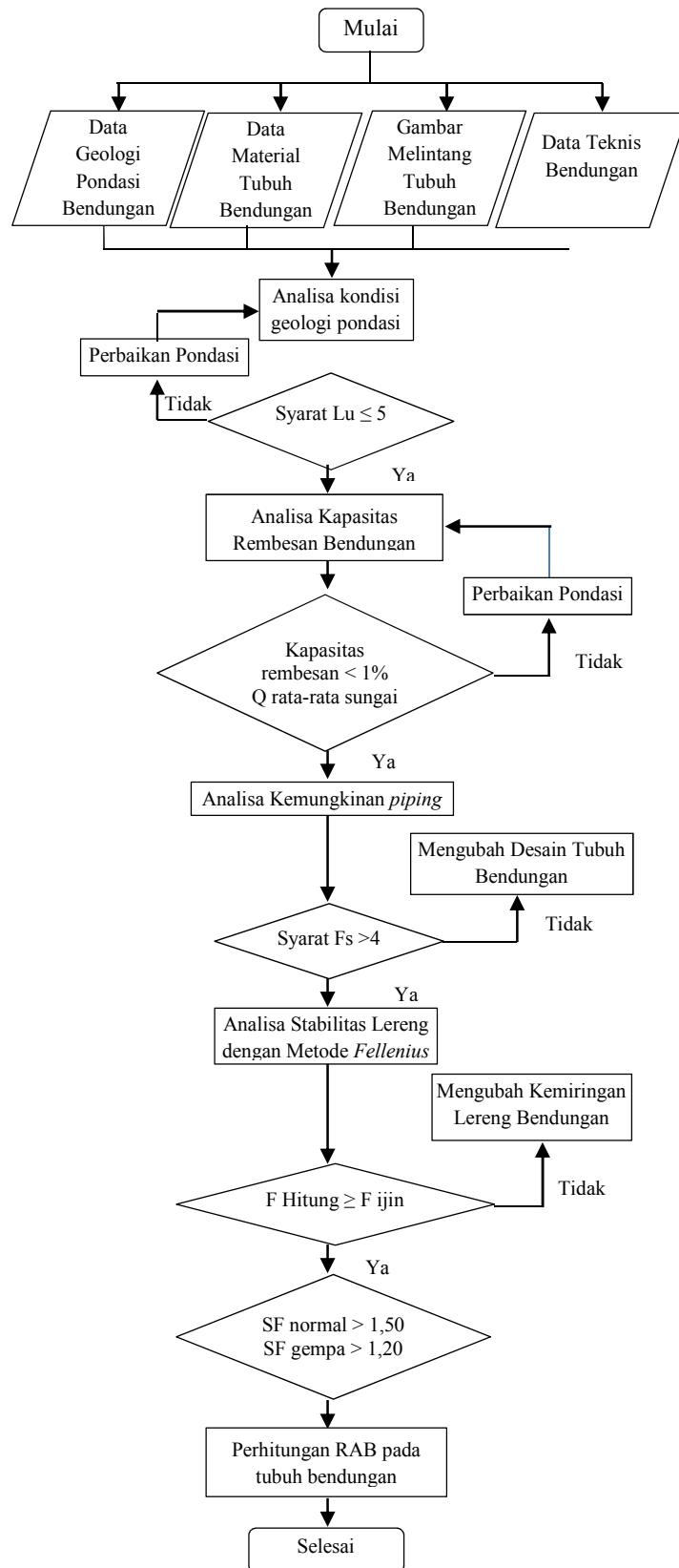
Tabel 2 Percepatan gempa dasar untuk berbagai periode ulang

| T (Tahun) | A_c (gal) |
|--------------|----------------|
| 10 | 90 |
| 20 | 120 |
| 50 | 160 |
| 100 | 190 |
| 200 | 220 |
| 500 | 250 |
| 1000 | 280 |
| 5000 | 330 |
| 10000 | 350 |

Sumber : Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2004:25)

Metode Perencanaan

Diagram alir analisa stabiliras tubuh bendungan pada Waduk Bendo Ponorogo pada **Gambar 1**.



Gambar 1 Diagram Alir Pengerjaan Studi
Sumber : Hasil Perhitungan

Hasil dan Pembahasan

Perbaikan Pondasi Pada Bendungan

Ditinjau dari kondisi geologi pondasi bendungan berdasarkan nilai RQD dan lugeon diperlukan perbaikan pondasi yang dimaksudkan untuk memperkuat kondisi pondasi bendungan. Berikut perbaikan pondasi yang digunakan sebagai berikut :

1) Sementasi Tirai (*Curtain Grouting*)

Untuk menentukan kedalaman sementasi tirai digunakan rumus empiris sebagai berikut :

$$d = \frac{1}{3}h + c$$

Diketahui :

$$h = 25,8 \text{ m (Sta 1)}$$

$$c = 10,5 \text{ (dilihat dari data pengeboran riverbed)}$$

$$d = \frac{1}{3} \times 25,8 + 10,5 = 19,1 \text{ m}$$

Hasil perhitungan kedalaman lubang pada **Tabel 1.**

Tabel 1 Kedalaman lubang *grouting* tiap Stasiun

| Sta | El. Dasar Pondasi (m) | El. Puncak Bendungan (m) | h Bendungan (m) | c (m) | d Grouting (m) |
|-----|-----------------------|--------------------------|-----------------|-------|----------------|
| 1 | 200.02 | 225.82 | 25.80 | 10.5 | 19.100 |
| 2 | 187.07 | 225.82 | 38.75 | 10.5 | 23.417 |
| 3 | 176.46 | 225.82 | 49.36 | 10.5 | 26.953 |
| 4 | 161.53 | 225.82 | 64.29 | 10.5 | 31.930 |
| 5 | 146.15 | 225.82 | 79.67 | 10.5 | 37.057 |
| 6 | 137.82 | 225.82 | 88.00 | 10.5 | 39.833 |
| 7 | 137.82 | 225.82 | 88.00 | 10.5 | 39.833 |
| 8 | 137.82 | 225.82 | 88.00 | 10.5 | 39.833 |
| 9 | 137.82 | 225.82 | 88.00 | 10.5 | 39.833 |
| 10 | 137.82 | 225.82 | 88.00 | 10.5 | 39.833 |
| 11 | 141.82 | 225.82 | 84.00 | 10.5 | 38.500 |
| 12 | 155.75 | 225.82 | 70.07 | 10.5 | 33.857 |
| 13 | 179.04 | 225.82 | 46.78 | 10.5 | 26.093 |
| 14 | 195.37 | 225.82 | 30.45 | 10.5 | 20.650 |
| 15 | 206.11 | 225.82 | 19.71 | 10.5 | 17.070 |
| 16 | 207.82 | 225.82 | 18.00 | 10.5 | 16.500 |

Sumber : Hasil Perhitungan

Penentuan jarak antar lubang *grouting* pada **Tabel 2.**

Tabel 2 Penentuan jarak antar lubang *grouting*

| Rumus | Kedalaman Lubang Grouting (m) | Jarak antar Lubang (m) |
|-------|-------------------------------|------------------------|
| I | 1/3 H + 10 ~ 20 | 3 atau kurang |
| II | 1/2 H | 1,5 |
| III | 0,7 H hingga 0,8 H | bervariasi |

Sumber : Departemen Pekerjaan Umum, 2005 : 123

2) Sementasi Konsolidasi (*Consolidation Grouting*)

Menurut pada “Pedoman *Grouting* untuk Bendungan” (Departemen Pekerjaan Umum) ditentukan jarak antar *grouting* sekitar 2,5 –

5 m dengan kedalaman 5 – 15 m. Pada Bendungan Bendo direncanakan perbaikan pondasi berupa *consolidation grouting* dengan jarak antar lubang bor 2,5 m dan kedalaman sedalam 5 m.

3) Sementasi Selimut (*Blanket Grouting*)

Berdasarkan “Pedoman *Grouting* untuk Bendungan” (Departemen Pekerjaan Umum) ditentukan jarak antar titik pengeboran *grouting* berkisar 2,5 – 5 m dengan kedalaman 5 – 15 m. Perbaikan pondasi *blanket grouting* pada Bendungan direncanakan dengan jarak 2,5 m dan kedalaman 15 m

Analisis Rembesan pada Bendungan

Perhitungan Garis Depresi

Elevasi puncak bendungan = 225,82 m

Elevasi muka air normal = 220,42 m

Elevasi dasar = 137,82 m

Lebar dasar inti = 33,8 m

Tinggi inti bendungan = (220,42 – 137,82) = 82,6 m

I₁ = 12,45 m

I₂ = 33,80 – 12,45 = 21,35 m

d = ($\frac{1}{3}$ x I₁) + I₂ = ($\frac{1}{3}$ x 12,45) + 21,35 = 25,09 m

Maka,

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d = \sqrt{82,6^2 + 25,09^2} - 25,09 = 61,237 \text{ m}$$

m

Parabola bentuk dasar didapatkan dengan persamaan sebagai berikut :

$$y = \sqrt{2 \cdot y_0 + (y_0)^2} = \sqrt{2 \cdot 61,24 X + (61,24)^2}$$

$$y = \sqrt{122,48 X + 3750,3376}$$

Hasil perhitungan koordinat parabola pada **Tabel 3.**

Tabel 3 Koordinat parabola garis depresi

| X | Y |
|--------|-------|
| -30.62 | 0.03 |
| 0 | 61.24 |
| 1 | 62.23 |
| 2 | 63.21 |
| 3 | 64.17 |
| 4 | 65.12 |
| 5 | 66.05 |
| 10 | 70.53 |
| 15 | 74.75 |
| 20 | 78.74 |

25.09 82.60
 Sumber : Hasil Perhitungan
 $\alpha = 81^\circ$
 $a + \Delta a = \frac{y_0}{1 - \cos \alpha} = \frac{61,24}{1 - \cos 81^\circ}$
 $= \frac{61,24}{1 - 0,1564} = 72,59 \text{ m}$
 Dengan $\alpha = 81^\circ$ dari grafik *cassagrande* didapatkan harga $C = 0,27$
 $\Delta \alpha = (a + \Delta a)c$
 $\Delta \alpha = 72,59 \times 0,27 = 19,60 \text{ m}$
 $\alpha = 72,59 - 19,59 = 52,99 \text{ m}$
 $k_1 = 2,86 \times 10^{-7} \text{ m/detik}$
 $k_2 = 6,96 \times 10^{-5} \text{ m/detik}$
 Dengan anggapan debit aliran filtrasi konstan, maka
 $Q = k_1 \cdot y_0 \cdot L$, maka
 $h_2 = \frac{k_1}{k_2} \cdot y_0$
 $= \frac{2,86 \times 10^{-7}}{6,96 \times 10^{-5}} \cdot 61,24 = 0,252 \text{ m}$
 Berdasarkan persamaan parabola dasar diperoleh persamaan berikut :

$$y = \sqrt{2 \cdot h_2 \cdot x + (h_2)^2}$$

$$2 \cdot h_2 = 2 \cdot 0,25 = 0,50$$

$$(h_2)^2 = (0,50)^2 = 0,0633$$

$$y = \sqrt{0,5x + 0,0633}$$

$$K_v = 2,86 \times 10^{-7} \text{ m/detik}$$

$$K_h = 5 \times K_v = 5 \times 2,86 \cdot 10^{-7}$$

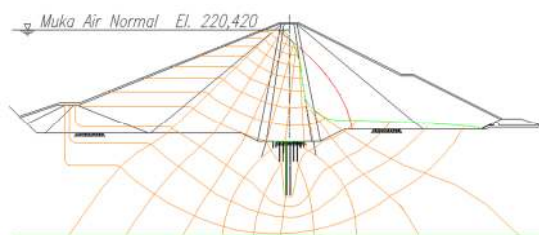
$$= 1,429 \times 10^{-6} \text{ m/detik}$$

$$\theta_1 = 75^\circ$$

$$\frac{K_h}{K_v} \tan \theta = \frac{1,429 \times 10^{-6}}{2,86 \times 10^{-7}} \tan 75^\circ = 18,66 \text{ m}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} 18,66 = 86^\circ 55'$$

Hasil perhitungan garis depresi untuk mendapatkan gambar jaringan trayektori potongan melintang bendungan pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Gambar jaringan trayektori pada potongan melintang bendungan sesudah *grouting*
 Sumber : Hasil Perhitungan

Kapasitas Aliran Filtrasi

Perhitungan kapasitas aliran filtrasi pada suatu bendungan yang didasarkan pada jaringan trayektori dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$Q_f = \frac{N_f}{N_p} K \cdot H \cdot L$$

Dari **Gambar 2** diperoleh perhitungan kapasitas aliran

$$N_f = 11, N_p = 11$$

$$K_v = \text{Koefisien vertikal} = 2,86 \times 10^{-5} \text{ cm/detik}$$

$$= 2,86 \times 10^{-7} \text{ m/detik}$$

$$K_h = \text{Koefisien horizontal} = 5 \times K_v$$

$$= 5 \times 2,86 \cdot 10^{-7} = 1,43 \times 10^{-6} \text{ m/detik}$$

$$K = \sqrt{2,86 \times 10^{-7} \times 1,43 \times 10^{-6}}$$

$$= 6,395 \times 10^{-8} \text{ m/detik}$$

Kapasitas rembesan =

$$Q_f = \frac{11}{11} \cdot 6,395 \times 10^{-7} \cdot 82,6 \cdot 309,5$$

$$= 0,016 \text{ m}^3 = 16 \text{ liter/detik}$$

$$= 1412,56 \text{ m}^3/\text{hari}$$

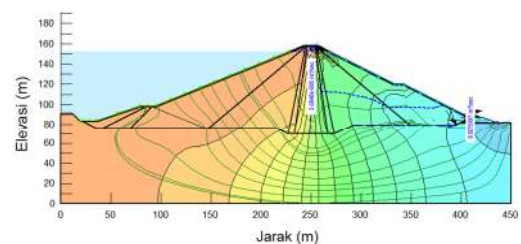
Analisa Rembesan Menggunakan Program Geo-Studio SEEP/W 2012

Untuk menghitung besarnya kapasitas aliran debit rembesan yang mengalir keluar dari tubuh bendungan digunakan *software* Geo-Studio SEEP/W. Analisa rembesan ditempatkan pada kondisi FWL elv. 224,92 m, NWL elv. 220,42 m, dan NWL elv. 220,42 m. Hasil analisa sebagai berikut :

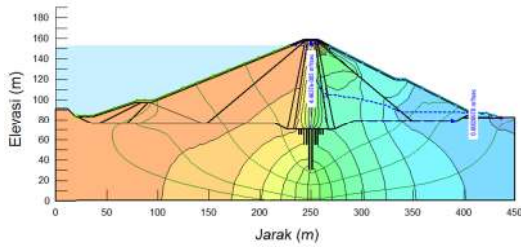
1. Sebelum *grouting*
 $Q_{rerata} = 0,0044 \text{ m}^3/\text{detik}$
2. Sesudah *grouting*
 $Q_{rerata} = 0,00017 \text{ m}^3/\text{detik}$

Kapasitas rembesan rata-rata (0,00017 m^3/detik) < 1% rata-rata limpasan (0,0094 m^3/detik) sehingga dapat disimpulkan kapasitas rembesan sesudah dilakukan *grouting* menjadi lebih kecil dan aman.

Hasil analisa aplikasi Seep/W sebelum *grouting* pada **Gambar 3**.



Gambar 3 Rembesan di tubuh bendungan dan pondasi pada muka air normal sebelum *grouting*
 Sumber : Hasil perhitungan
 Hasil analisa aplikasi Seep/W sesudah *grouting* pada **Gambar 4**.



Gambar 4 Rembesan di tubuh bendungan dan pondasi pada muka air normal sesudah *grouting*
 Sumber : Hasil perhitungan

Analisa Kemungkinan Terhadap *Piping*

Perhitungan kecepatan aliran filtrasi berikut ini menggunakan jaringan aliran filtrasi.

$$V_c = \sqrt{\frac{W1.g}{F.y}}$$

$$V_c = \sqrt{\frac{2,9099 \times 10^{-12} \times 980}{1,767 \times 10^{-8} \times 1}}$$

$$= 0,4017 \text{ cm/detik} = 0.004017 \text{ m/detik}$$

Hasil dari perhitungan menunjukkan kecepatan rembesan ($V_s = 7,3816 \times 10^{-5}$ cm/detik) < kecepatan kritis ($V_c = 0,4017$ cm/detik) sehingga dapat disimpulkan tidak akan terjadi bahaya terhadap *piping*.

FK Terhadap *Piping*

- Gradien Hidraulik Kritis

$$I_c = \frac{(G_s - 1)}{(1 + e)}$$

$$I_c = \frac{(2,646 - 1)}{(1 + 1,24)}$$

$$I_c = 0.73482$$

- Gradien Hidraulik Keluar

$$I_e = 0,614$$

$$F_k = \frac{I_c}{I_e}$$

$$F_k = \frac{0,735}{0,614} = 11,97$$

Hasil perhitungan menunjukkan FK hitungan ($11,97$) < FK izin (4) sehingga dapat disimpulkan pada bendungan tidak terjadi peristiwa *piping*.

Perhitungan Stabilitas Lereng pada Tubuh Bendungan

Perhitungan stabilitas lereng pada tubuh Bendungan Bendo menggunakan metode *Fellenius*. Berikut adalah parameter tanah masing-masing zona timbunan pada Bendungan Bendo.

Tabel 4 Data tanah masing-masing zona timbunan Bendungan

| Parameter | Satuan | Zona Inti | Zona Filter | Zona Random | Zona Batu | Zona Rip-Rap |
|-------------------|-------------------|-----------|-------------|-------------|-----------|--------------|
| Permeabilitas | Cm/detik | 2.86E-05 | 6.96E-03 | 1.85E-03 | 2.40E-01 | 2.40E-01 |
| Gs | | 2,646 | 2,566 | 2,665 | 2,492 | 2,492 |
| γ_t | kN/m ³ | 18,13 | 15,73 | 19,87 | 14,69 | 14,69 |
| γ_d | kN/m ³ | 13,55 | 15,55 | 17,82 | 13,46 | 13,46 |
| γ_{sat} | kN/m ³ | 16,69 | 19,06 | 20,85 | 17,87 | 17,87 |
| γ_{sub} | kN/m ³ | 8,33 | 9,26 | 11,04 | 8,06 | 8,06 |
| Kohesi | kN/m ² | 37,27 | - | 51,19 | 25,69 | 25,69 |
| Sudut Geser Dalam | derajat | 19,5 | 30 | 43,86 | 40,25 | 40,25 |

Sumber : PT. Utama Karya

Perhitungan Metode *Fellenius*

Perhitungan pada kondisi NWL elv. 220,42 m dengan beban gempa. Berikut langkah perhitungannya :

1. Membuat bidang luncur pada lereng dan menentukan pusat bidang luncur. Usahakan setiap bagian irisan memiliki lebar yang sama

2. Menghitung beban berat total (W_{total}) tiap irisan yang merupakan jumlah dari gaya berat kering (W_1) + gaya berat basah (W_2). Pada contoh perhitungan menggunakan irisan 3, sehingga didapatkan nilai :

$$W_{total} = W_1 + W_2$$

$$= A_1 \cdot \gamma + A_2 \cdot \gamma_{sub}$$

- Zona Random

$$W_{total} = 0 \cdot 19,87 + 290,76 \cdot 11,04$$

$$= 0 + 3210,67 = 3210,67$$

kN

- Zona Batu

$$W_{total} = 492,79 \text{ kN}$$

- Zona Rip-Rap

$$W_{total} = 128,26 \text{ kN}$$

3. Menentukan sudut dari jari-jari bidang longsor dengan arah gaya berat masing-masing irisan (α). Sudut dari pias 3 = $34,24^\circ$.

4. Menghitung beban berat komponen tangensial bidang longsor bendungan, yaitu dengan perhitungan sebagai berikut :

$$T = W \cdot \sin \alpha$$

$$\sin \alpha = 0,56$$

- Zona Random

$$T = 3210,67 \cdot 0,56$$

$$= 1906,52 \text{ kN}$$

- Zona Batu

$$T = 277,28 \text{ kN}$$

- Zona Rip-Rap

$$T = 72,50 \text{ kN}$$

5. Menghitung beban berat vertikal yang bekerja pada dasar irisan bendungan, dengan perhitungan sebagai berikut :

$$N = W \cdot \cos \alpha$$

$$\cos \alpha = 0,83$$

- Zona Random

$$N = 3210,67 \cdot 0,83 = 2123,26 \text{ kN}$$

- Zona Batu

$$N = 325,89 \text{ kN}$$

- Zona Rip-Rap

$$N = 85,21 \text{ kN}$$

6. Menghitung nilai kohesi terhadap gejala peluncuran, yaitu :

$$c' = c \cdot l$$

$$= c \cdot \frac{b}{\cos \alpha}$$

- Zona Random

$$c' = 51,19 \cdot \frac{10}{\cos 0,83} = 619,23 \text{ kN}$$

- Zona Batu

$$c' = 310,80 \text{ kN}$$

- Zona Rip-Rap

$$c' = 310,80 \text{ kN}$$

7. Semua prosedur perhitungan diulang sampai semua irisan membentuk bidang longsor, kemudian nilai F_s dihitung sebagai berikut :

$$F_s = \frac{\sum\{c'.l + (N - U - Ne) \tan \theta\}}{\sum(T - Te)}$$

Nilai U digunakan jika waduk telah terisi oleh air serta nilai Ne dan Te digunakan dalam kondisi gempa.

$$F_s = \frac{\sum\{c'.l + (N \cdot \tan \theta)\}}{\sum T}$$

$$F_s = \frac{66162,85}{19862,51} = 3,331$$

8. Menghitung nilai koefisiensi gempa menggunakan rumus empiris sebagai berikut:

$$Ad = Z \cdot Ac \cdot v$$

$$k = \frac{Ad}{g}$$

Mencari nilai Ad

Diketahui :

$$Z = 0,9$$

$$Ac = 190 \text{ (100 tahun)}$$

$$v = 0,8$$

$$Ad = 0,9 \cdot 190 \cdot 0,8 = 136,8$$

Sehingga nilai k,

$$k = \frac{136,8}{9,81} = 0,1394$$

9. Menghitung nilai komponen vertikal (Ne) dan komponen tangensial (Te) beban seismis yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur :

$$Te = k \cdot W_{total} \cdot \cos \alpha$$

$$Ne = k \cdot W_{total} \cdot \sin \alpha$$

- Zona Random

$$Te = 0,1394 \cdot 3210,67 \cdot \cos 34,24^\circ = 370,13 \text{ kN}$$

$$Ne = 0,1394 \cdot 3210,67 \cdot \sin 34,24^\circ = 251,92 \text{ kN}$$

- Zona Batu

$$Te = 56,81 \text{ kN}$$

$$Ne = 38,67 \text{ kN}$$

- Zona Rip-Rap

$$Te = 14,85 \text{ kN}$$

$$Ne = 10,11 \text{ kN}$$

10. Menghitung gaya *uplift* (U) saat waduk terisi air, dimana γ_w merupakan gaya berat air dan h_w adalah ketinggian irisan basah menurut zona material timbunan, yaitu :

$$U = \gamma_w \cdot h_w \cdot l$$

- Zona Random

$$U = 9,81 \cdot 14,24 \cdot 15,12 = 1689,81 \text{ kN}$$

- Zona Batu

$$U = 210,04 \text{ kN}$$

- Zona Rip-rap

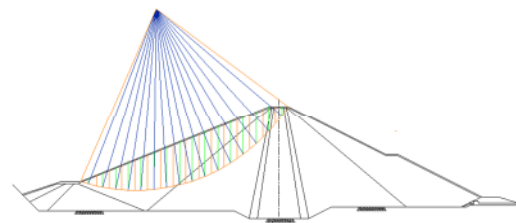
$$U = 64,08 \text{ kN}$$

11. Semua prosedur perhitungan diulang sampai semua irisan membentuk bidang longsor, kemudian nilai F_s dihitung sebagai berikut :

$$F_s = \frac{\sum\{c'.l + (N - U - Ne) \tan \theta\}}{\sum(T - Te)}$$

$$F_s = \frac{21947,64}{18053,77} = 1,216$$

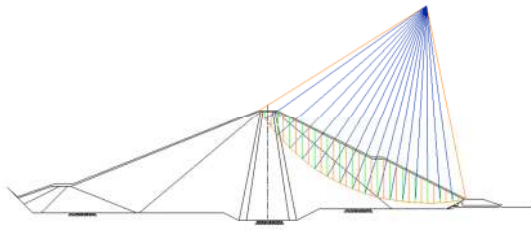
Hasil perhitungan stabilitas lereng metode *Fellenius* di hulu bendungan pada **Gambar 5**.



Gambar 5 Gambar bidang luncur pada hulu bendungan

Sumber : hasil perhitungan

Hasil perhitungan stabilitas lereng metode *Fellenius* di hilir bendungan pada **Gambar 6**.



Gambar 6 Gambar bidang luncur pada hilir bendungan

Sumber : Hasil perhitungan

Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari pembahasan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- 1) Ditinjau dari keadaan geologi pondasi Bendungan Bendo memerlukan perbaikan pondasi berdasarkan nilai lugeon dan *RQD*. Perbaikan pondasi yang diperlukan adalah *curtain grouting* dengan kedalaman = 7,87m – 39,833 dan jarak antar lubang 3 m, *consolidation grouting* dengan kedalaman 5 m dan jarak antar lubang 2,5 m, serta *blanket grouting* dengan kedalaman 15 m dan jarak antar lubang 2,5 m.
- 2) Perhitungan kapasitas rembesan Bendungan Bendo menunjukkan hasil :
 - Perhitungan manual
Kapasitas rembesan sebelum *grouting* = 0,0179 m³/detik
Kapasitas rembesan sesudah *grouting* = 0,0164 m³/detik
 - Analisis menggunakan program Geo-Studio SEEP/W 2012
Sebelum *grouting* = 0,00444 m³/detik
Sesudah *grouting* = 0,00017 m³/detik
Sehingga dapat disimpulkan pengerjaan *grouting* dapat mengurangi kapasitas rembesan yang terjadi.
- 3) Dari perhitungan analisa kemungkinan piping menunjukkan :
 - Perhitungan kecepatan aliran filtrasi didapat angka kecepatan rembesan ($V_s = 0,0041017$ m/detik) < kecepatan kritis ($V_c = 7.38161E-07$ m/detik) sehingga dapat disimpulkan tidak akan terjadi peristiwa *piping*
 - Perhitungan faktor keamanan didapatkan angka keamanan ($FK = 11,97 > 4$) sehingga dapat disimpulkan tidak akan terjadi peristiwa *piping*.
- 4) Perhitungan stabilitas lereng dengan berbagai kondisi menggunakan metode *Fellenius* didapatkan hasil :
 - Kondisi setelah selesai konstruksi pada hulu tanpa beban gempa = 3,331

- Kondisi setelah selesai konstruksi pada hilir tanpa beban gempa = 2,65
 - Kondisi setelah selesai konstruksi pada hulu dengan beban gempa = 2,288
 - Kondisi setelah selesai konstruksi pada hilir dengan beban gempa = 1,89
 - Kondisi NWL elv. 220,42 m pada hulu tanpa beban gempa = 1,991
 - Kondisi NWL elv. 220,42 m pada hulu dengan beban gempa = 1,216
 - Kondisi NWL elv. 220,42 m pada hilir tanpa beban gempa = 2,62
 - Kondisi NWL elv. 220,42 m pada hilir dengan beban gempa = 1,88
 - Kondisi FWL elv. 224,92 m pada hulu tanpa beban gempa = 1,935
 - Kondisi FWL elv. 224,92 m pada hulu dengan beban gempa = 1,203
 - Kondisi FWL elv. 224,92 m pada hilir tanpa beban gempa = 2,61
 - Kondisi FWL elv. 224,92 m pada hilir dengan beban gempa = 1,86
- 5) Hasil analisa perhitungan biaya dari pekerjaan timbunan utama dari pekerjaan persiapan sampai pekerjaan *grouting* membutuhkan biaya sebesar Rp290.388.884.070,62.

Daftar Rujukan

- Andriantok, N. K. (2016). Analisa Stabilitas Tubuh Bendungan Seulimeum Kabupaten Aceh Besar Nanggroe Aceh Darussalam (*Doctoral dissertation, Universitas Brawijaya*).
- Arbana, I. (2017). Analisa Rencana Anggaran Biaya Terhadap Pelaksanaan Pekerjaan Perumahan Dengan Melakukan Perbandingan Perhitungan Harga Satuan Bahan Berdasarkan Survey Lapangan (studi kasus: Perumahan Green Ratu Kuta Mehuli di Kota Tanjungbalai).
- Astuti, Y., Masrevaniah, A., & Marsudi, S. (2012). Analisa Rembesan Bendungan Bajulmati terhadap Bahaya Piping untuk Perencanaan Perbaikan Pondasi. *Jurnal Teknik Pengairan*, 3(1), 51-60. (<http://www.jurnalpengairan.ub.ac.id>)
- Das, Braja M, dkk. (1993) *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 1*, Erlangga, Jakarta.

- Departemen Pekerjaan Umum. (2005). *Pedoman Grouting untuk Bendungan* : sda.pu.go.id
- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. (2004). *Analisis Stabilitas Bendungan Tipe urugan Akibat Beban Gempa* : sni.litbang.pu.go.id
- Dewa, G.W.R. (2014) Analisa STabilitas Tubuh Bendungan Lolak Kabupate Bolaang Mongondow Sulawesi Utara, Unpublished Thesis, Universitas brawijaya, Malang.
- Hardiyatmo, Hary C. (2002). *Mekanika Tanah II Edisi – 3*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Ilham, Muchammad., Heri Suprijanto, Runi Asmaranto. (2015). Analisa Stabilitas Tubuh Bendungan pada Bendungan Utama Tugu Kabupaten Trenggalek. *Jurnal Universitas Brawijaya* : Malang
- Iman, Ismi S. P. (2018). Perencanaan Perkuatan Tanah Menggunakan Perbandingan Metode *Grouting* dan *Geotextile* pada *Maindam* Pembangunan Waduk Bendo Ponorogo, Malang: Politeknik Negeri Malang.
- Nasmiartha, Zhafarina M., Hendrawan, A.P., & Saputra, A.W.W. (2016) Analisa Stabilitas tubuh bendungan pada Perencanaan Bendungan Ladongi Kabupaten Kolaka Timur Sulawesi Tenggara, *Jurnal Teknik Pengairan* Tidak Dipublish. (<http://pengairan.ub.ac.id>)
- Nurdian, S., Setyanto, S., & Afriani, L. (2015). Korelasi Parameter Kekuatan Geser Tanah dengan Menggunakan Uji Triaksial dan Uji Geser Langsung Pada Tanah Lempung Substitusi Pasir. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain*, 3(1), 13-26. (<http://journal.eng.unila.ac.id>)
- Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi. (2017). *Analisa Stabilitas Bendungan : Perhitungan Rembesan* : <https://simantu.pu.go.id>
- Sosrodarsono, S. (1977). *Bendungan Type Urugan Cetakan Keempat*, PT. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Sutejo, Y., Dewi, R., Haryadi, D., & Kurniawan, R. (2015). Analisis Pengaruh Campuran Pupuk Urea Terhadap Kuat Geser Tanah Lempung Lunak Dengan Uji Triaxial. *Cantilever*, 4(1). (<http://cantilever.unsri.ac.id>)
- Wikipedia.org/wiki/bendungan diaakses pada 7 Januari 2019