

# Kajian Perbaikan Pondasi Kombinasi *Plastic Concrete Cut Off Wall* dan Grouting Pada Pembangunan Bendungan Tugu Kabupaten Trenggalek

Yahya Eko Maryanto Setiawan<sup>1</sup>, Runi Asmaranto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Program Sarjana Teknik Jurusan Teknik Pengairan Universitas Brawijaya

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Email: yahyaeko96@gmail.com

**ABSTRAK:** Pondasi bendungan merupakan salah satu komponen bendungan yang harus diperhatikan. Dari hasil investigasi geologi pada pondasi Bendungan Tugu dijumpai kedalaman alluvial kollovial dasar sungai mencapai 5–36 m (dari dasar sungai) dengan rerata kualitas batuan dari nilai RQD adalah *very poor* dan *poor*. Dari hasil *Water Pressure Test* menunjukkan masih banyak nilai lugeon > 3. Dengan pertimbangan kondisi geologi pondasi, maka untuk memperbaiki kondisi geologi pondasi secara efektif dan efisien dibutuhkan perbaikan pondasi kombinasi *plastic concrete cut off wall* dan grouting. Kedalaman *plastic concrete cut off wall* direncanakan dengan mempertimbangkan kedalaman lapisan kollovial dan material mengacu pada ICOLD (1985). Grouting yang direncanakan pada Bendungan Tugu meliputi *curtain*, *sub curtain* dan *consolidation grouting*. Dilakukan analisa keamanan bendungan (debit rembesan, *piping* dan deformasi) menunjukkan bahwa bendungan dalam kondisi aman setelah perbaikan pondasi.

Kata kunci: Bendungan Tugu, Geologi, Perbaikan Pondasi, *Plastic Concrete Cut Off Wall*, dan Grouting.

**ABSTRACT:** The dam foundation is one of the dam components that must be considered. From the result of geological investigation on foundation of Tugu Dam found the depth of alluvial kollovial river basin reach 5-36 m (from river bed) with mean of rock quality from RQD value is very poor and poor. From the results of Water Pressure Test shows that there are still many lugeon values > 3. With consideration of the foundation's geology condition, to improve the foundation's geological condition effectively and efficiently it is needed to improve the foundation of plastic concrete cut off wall and grouting combination. The depth of the plastic concrete cut off wall is planned by considering the depth of the kollovial layer and the material refers to ICOLD (1985). Grouting planned at Tugu Dam covers curtain, sub curtain and consolidation grouting. Conducted a dam safety analysis (seepage discharge, piping and deformation) shows that the dam is in safe condition after the foundation repair.

Keywords: Tugu Dam, Geology, Foundation Improvement, *Plastic Concrete Cut Off Wall*, and Grouting.

## PENDAHULUAN

Kondisi geologi pondasi bendungan sering dihadapkan pada permasalahan adanya pelapukan batuan yang tidak merata, retakan, kekar, dan jalur sesar (Soedibyo, 2003:271). Permasalahan struktur geologi tersebut akan membuka jalan air rembesan, *piping*, *boiling* dan menyebabkan deformasi plastis (*plastic deformation*) bila terkena beban, sehingga pondasi rencana bendungan membutuhkan perbaikan atau perkuatan untuk mengatasi kebocoran dan kemungkinan penurunan (*settlement*) yang tidak merata dari tubuh bendungan.

Berdasarkan hasil investigasi geologi yang telah dilaksanakan setelah galian pondasi *core trench* menunjukkan bahwa pondasi bendungan terletak pada batuan lapuk kuat, alluvial sungai dan kollovial. Lapisan-lapisan ini mempunyai tingkat permeabilitas yang tinggi atau porus. Dengan mempertimbangkan kondisi geologi pondasi tersebut, apabila hanya dilakukan perbaikan pondasi dengan metode grouting pada pondasi bendungan akan tidak efektif dan kurang ekonomis karena letak batuan keras yang terlalu dalam dan lapisan kollovial yang

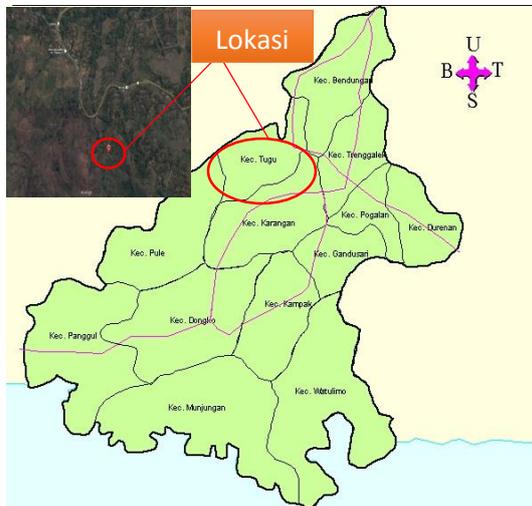
tebal. Sehingga perbaikan pondasi Bendungan Tugu akan lebih efektif dan ekonomis apabila dilakukan dengan kombinasi *plastic concrete cut off wall* dan grouting (sementasi).

**BAHAN DAN METODE**

**Lokasi Studi**

Bendungan Tugu berada di Sungai Keser Desa Nglingsis, Kecamatan Tugu, Kabupaten Trenggalek Jawa Timur dan terletak antara garis lintang selatan 8° 1' dan 8° 3' dan garis bujur timur 111° 34' dan 111° 37' dengan batas – batas wilayah :

- Utara : Kabupaten Ponorogo
- Selatan : Samudera Hindia
- Timur : Kabupaten Tulungagung
- Barat : Kabupaten Pacitan



**Gambar 1. Lokasi Bendungan Tugu**  
 Sumber: Laporan Akhir Bendungan Tugu, 2013

**Kondisi Geologi Pondasi Bendungan**

Kondisi geologi ditinjau dari nilai *Rock Quality Designation* (RQD) dan nilai lugeon hasil *Water Pressure Test* (WPT) yang didapatkan dari hasil investigasi geologi.

*Rock Quality Designation* (RQD) didefinisikan sebagai persentase sampel *coring* batuan yang memiliki panjang ≥ 10 cm terhadap panjang total sampel hasil *coring*. Digunakan untuk mengetahui kekuatan massa batuan.

$$RQD = 100 (0,1 \lambda + 1) e^{-0,1 \lambda} \tag{1}$$

Dimana: RQD = *Rock Quality Designation* (%)  
 λ = rasio antara jumlah kekar dengan panjang scan-line (kekar/m)

WPT bertujuan untuk mengetahui besarnya rembesan pondasi (lugeon) bendungan, butuh tidaknya dilakukan grouting, tekanan dan campuran yang sesuai ketika

pelaksanaan grouting. Nilai lugeon didapatkan dengan rumus:

$$Lu = \frac{10Q}{P} \tag{2}$$

Dimana: Q = Debit injeksi (l/menit)  
 P = Tekanan injeksi (kg/cm<sup>2</sup>)

**Tegangan Vertikal Pondasi Bendungan**

Analisa tegangan vertikal pada pondasi bendungan dilakukan dengan metode Osterberg dan pada kedalaman pondasi (z) 0 - 30 m dari galian pondasi *cut off trench*. Tegangan vertikal dihitung dengan rumus:

$$\sigma_z = (I_1 + I_2)q \tag{3}$$

Dimana:

σz = Tegangan vertikal yang terjadi pada kedalaman z (kN/m<sup>2</sup>)

I = Faktor pengaruh (tanpa dimensi)  
 $= \frac{1}{\pi} \left[ \left( \frac{a+b}{a} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{b}{a} \alpha_2 \right]$

q = Beban tubuh bendungan (kN/m<sup>2</sup>)

a = Panjang lengan pada bidang miring tubuh bendungan (m)

b = Panjang lengan pada bidang datar tubuh bendungan (m)

z = Kedalaman tegangan vertikal pada pondasi (m)

α<sub>1</sub> = Sudut pengaruh kedalaman berdasarkan panjang a (radian)

α<sub>2</sub> = Sudut pengaruh kedalaman berdasarkan panjang b (radian)

Untuk beban timbunan digunakan rumus:

$$q = H \times \gamma_{sat} \tag{4}$$

Dimana: q = Beban timbunan tubuh bendungan (kN/m<sup>2</sup>)

H = Tinggi bendungan (m) = 89,85 m (*main dam*)

γ<sub>sat</sub> = Berat material timbunan terbesar (kN/m<sup>3</sup>)

**Rembesan Tubuh dan Pondasi Bendungan**

Analisa rembesan dilakukan dengan menggunakan program Geostudio SEEP/W 2007. Teori dasar yang digunakan dalam menghitung rembesan pada tubuh dan pondasi bendungan adalah dengan menggunakan rumus Darcy: (Sosrodarsono, 1981:96)

$$Q_f = \frac{N_f}{N_p} \times k \times H \times L \tag{5}$$

$$v = k \times i \tag{6}$$

Dimana :

$Q_f$  = Kapasitas rembesan ( $m^3/dt$ )

$N_f$  = angka pembagi dari garis trayektori aliran filtrasi

$N_p$  = angka pembagi dari garis equi-potensial

$k$  = koefisien filtrasi ( $m^3/dt$ )

$H$  = tinggi tekanan air total (m)

$L$  = panjang melintang tubuh bendungan (m)

$V$  = kecepatan rembesan (m/dt)

$i$  = gradien hidrolis

### Material Plastic Concrete Cut Off Wall

Penggunaan material *plastic concrete cut off wall* mengacu pada ICOLD (1985) dengan spesifikasi sebagai berikut:

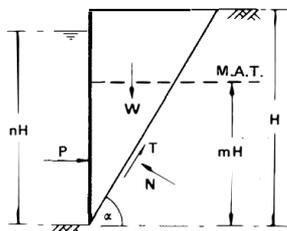
**Tabel 1.** Karakteristik Material Dinding Halang

Jenis Material	Kekuatan (Mpa)	Permeabilitas (m/dtk)	Deformabilitas	Sifat Retakan	Komposisi
Beton tremi	30 – 50	$10^{-12}$	Kaku	Mudah retak (brittle)	Semen + agregat slump 20 cm w/c = 0,5 – 0,7
Beton plastis	1,0 – 3,0	$10^{-9}$	Tinggi	Tahan terhadap regangan sampai 10 % tanpa retak	Semen + agregat + lempung + bentonit w/c $\cong$ 0,5
Slurry semen/bentonite	0,1 – 1,0	$10^{-8}$	Sangat tinggi	Tahan terhadap deformasi dan tekanan lateral	Semen + bentonit w/c $\cong$ 0,5

Sumber: ICOLD, Bulletin 129 (2005)

### Stabilitas Lubang Bekas Bor Beton Plastis

Stabilitas lubang bekas bor dipengaruhi oleh campuran bentonite yang melekat pada dinding lubang atau kerapatan minimum campuran.



**Gambar 2.** Analisa Stabilitas Lubang

Sumber: Craig (1991:204)

Dengan menggunakan rumus: (Craig 1991:204)

$$P = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{bentonite} \cdot (nH)^2 \quad (7)$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{soil} \cdot H^2 \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

$$U = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot (mH)^2 \cdot \operatorname{cosec} \alpha \quad (\text{Tekanan oleh air tanah}) \quad (9)$$

Dimana :

$nH$  : Kedalaman campuran (m)

$mH$  : Muka air tanah (m)

$H$  : Kedalaman parit (H)

$\gamma_s$  : Berat jenis campuran ( $Kg.cm^{-3}$ )

$\gamma$  : Berat jenis ( $Kg.cm^{-3}$ )

$N \ \& \ T$  : Gaya resultan bidang runtuh

$\alpha$  :  $45 + \phi/2$

### Kedalaman Grouting

Untuk mengetahui kedalaman *curtain grouting* pada pondasi Bendungan Tugu didasarkan rumus empiris:

$$D = \frac{1}{3} \times h + C \quad (10)$$

Dimana :

$D$  = Kedalaman lubang *grouting* (m)

$h$  = Tinggi bendungan (m)

$C$  = Konstanta (7,5 m pada batuan utuh)

(10,5 m pada batuan rekah-rekah/*porous*)

### Pola Grouting

Pola grouting direncanakan berdasarkan efektivitas grouting yang didapatkan dari nilai lugeon sebelum dan sesudah grouting ketika pelaksanaan *trial grouting*.

### Efektivitas Perbaikan Pondasi

Nilai efektivitas perbaikan pondasi didapatkan dari perhitungan dengan rumus:

$$Efs = 100 - (KG/K) \times 100 \quad (11)$$

Dimana:

$Efs$  = Efektivitas grouting dalam persen (%)

$Kg$  = Permeabilitas setelah grouting

$K$  = Permeabilitas sebelum grouting

### Kontrol Keamanan Piping dan Boiling

Rembesan pada bendungan dapat mengakibatkan peristiwa *piping* dan *boiling* dan dihitung dengan rumus: (Hardiyatmo, 2007: 36)

$$FK_{piping} = \frac{i_{cr}}{i_{cal}} \quad (12)$$

$$i_{cr} = \frac{(Gs-1)}{(1+e)} \quad (13)$$

$$V_c = \frac{\sqrt{Wl \times g}}{F \times \gamma_w} \quad (14)$$

Dimana :

$FK_{piping}$  = minimal 4

$i_{cal}$  = gradien hidraulik debit

- Icr = gradien hidraulik dari material timbunan atau pondasi  
 Gs = berat jenis material (*specific gravity*)  
 e = angka porositas  
 Vc = Kecepatan Kritis ( $V_s < V_c$ )

### Analisa Deformasi

Teori dasar deformasi atau perubahan bentuk adalah hukum Hook yang diaplikasikan dalam mekanika tanah dengan percobaan konsolidasi yaitu penurunan bendungan akibat pembebanan konstruksi di atasnya. Seiring perkembangan teknologi, analisa deformasi juga dapat dilakukan dengan menggunakan program Geostudio Sigma/W 2007.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik Geologi Pondasi Bendungan Tugu

Investigasi geologi pondasi Bendungan Tugu dilakukan pada sandaran kanan (*right bank*), dasar sungai (*riverbed*), dan sandaran kiri (*left bank*).

Dari data bor log yang dilaksanakan ketika detail desain, survey investigasi tambahan dan pelaksanaan konstruksi didapatkan nilai rata – rata RQD sebagai berikut:

#### Sandaran kanan

Dari data bor log DD-09 sedalam 40 m dan DD-12 sedalam 36 m dari tanah asli didapatkan nilai RQD rerata 34.17 % (*Poor*).

#### Dasar sungai

Dari data hasil bor log DD-7 sedalam 60 m, DD-8 sedalam 40 m, SI-1 sedalam 20 m, GT-1 sedalam 45 m, BTH-1 sedalam 85 m, BT-3 sedalam 40 m, GT.3-PH sedalam 48 m dan GT.4-PH sedalam 41 m dari tanah asli didapatkan nilai RQD rerata 49.26 % (*Poor*).

#### Sandaran kiri

Dari data hasil bor log DD-5 sedalam 60 m, DD-6 sedalam 40 m, GT-2 sedalam 30 m, BT-14 sedalam 35 m dari tanah asli didapatkan rerata 49.91 % (*Poor*).

**Tabel 2.** Kualitas Massa Batuan

Core Recovery (%)	Kekerasan Batuan	RQD (%)	Kualitas Batuan
>85	Keras ( <i>sound</i> )	> 90	Istimewa ( <i>excellent</i> )
50 ~ 85	Menengah Keras ( <i>moderately sound</i> )	75 ~ 90	Baik ( <i>good</i> )
35 ~ 50	Menengah Lunak ( <i>moderately soft</i> )	50 ~ 75	Menengah ( <i>fair</i> )
<35	Lunak ( <i>Soft</i> )	<25	Sangat jelek ( <i>very poor</i> )

### Water Pressure Test Bendungan Tugu

*Water Pressure Test* (WPT) dilakukan pada sandaran kanan (*right bank*), dasar sungai (*riverbed*), dan sandaran kiri (*left bank*). Pelaksanaan *Water Pressure Test* dilaksanakan setelah pengeboran untuk investigasi geologi dan dicuci bersih dengan menyemprotkan air ke dalam lubang sampai air yang keluar sudah jernih dan menggunakan alat *packer*.

Dari pelaksanaan WPT dihasil bahwa nilai lugeon sebagai berikut:

#### Sandaran kanan

Nilai Lu > 3 untuk kedalaman 0 – 60 m dari dasar sungai mencapai 100 % dari total nilai Lu total dari WPT dengan lugeon maksimum mencapai 208.35 pada kedalaman 0 – 5 m (DD-9).

#### Dasar sungai

Nilai Lu > 3 untuk kedalaman 0 – 85 m dari dasar sungai mencapai 72.22 % dari total nilai Lu WPT dasar sungai dengan lugeon maksimum mencapai 85.31 pada kedalaman 35 – 40 m (dibawah dinding halang) DD-7.

#### Sandaran kiri

Nilai Lu > 3 untuk kedalaman 0 – 60 m dari dasar sungai mencapai 89.47 % dari total nilai Lu total dari WPT dengan lugeon maksimum mencapai 248.34 pada kedalaman 10 – 15 m ketika WPT BT-14.

### Analisa Rembesan Sebelum Perbaikan Pondasi

Analisa rembesan dilakukan menggunakan program SEEP/W 2007 pada kondisi muka air waduk kondisi maksimum elevasi +243.56 m, kondisi normal elevasi +239.05 m, dan kondisi minimum elevasi +202.35 m. Ketiga analisa tersebut dijalankan tanpa *treatment* perbaikan pondasi.

Analisa rembesan pada kondisi tanpa perbaikan pondasi dilakukan untuk mengetahui pola aliran yang terjadi pada pondasi serta besarnya debit rembesan pada pondasi pada kondisi awal yang nantinya akan dibandingkan dengan debit rembesan setelah perbaikan pondasi untuk melihat efektivitas dari perbaikan pondasi bendungan. Dari hasil analisa didapatkan kapasitas rembesan tubuh dan pondasi bendungan sebagai berikut:

-El +243.56 m = 0.0363 m<sup>3</sup>/dt.

-El +239.05 m = 0.0344 m<sup>3</sup>/dt.

-El +202.35 m = 0.0185 m<sup>3</sup>/dt.

-Rata – rata = 0.0297 m<sup>3</sup>/dt.

Mengacu pada batasan yang berlaku di Jepang (*Japanese Institute of Irrigation and*

*Drainage*), besarnya angka kebocoran (debit rembesan) yang melewati pondasi dan tubuh bendungan tidak boleh lebih dari 1 % debit rerata tahunan inflow waduk (Departemen Pekerjaan Umum, Pedoman Grouting untuk Bendungan, 2005:21).

Diketahui:

- Q sungai rata-rata (inflow) = 1.33 m<sup>3</sup>/dt
- 1 % dari Q rata-rata sungai = 0.0133 m<sup>3</sup>/dt.
- Rata-rata kapasitas rembesan = 0.0297 m<sup>3</sup>/dt.

Rata-rata kapasitas rembesan (0,0297 m<sup>3</sup>/dt) > 1 % dari Q rata-rata sungai (0,0133 m<sup>3</sup>/dt). Sehingga, dapat diketahui kapasitas rembesan yang terjadi pada pondasi dan tubuh Bendungan Tugu tidak memenuhi dari syarat yang ditetapkan.

### Tegangan Vertikal Pondasi Bendungan

Perhitungan tegangan vertikal yang terjadi dibawah pondasi Bendungan Tugu dilakukan perhitungan tiap kedalaman pondasi dari kedalaman (Z) 0 – 30 m dari dasar tubuh bendungan.

$$q = H \times \gamma_{\text{sat}}$$

$$q = 89.85 \text{ m} \times 22.59 \text{ kN/m}^3$$

$$q = 2029.71 \text{ kN/m}^2$$

Misal tegangan vertikal dibawah pondasi As Bendungan Tugu pada kedalaman 0 m dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\sigma_z \text{ as main dam} = (I_1 + I_2)q_{\text{main dam}}$$

$$z = 0 \text{ m}$$

$$a = 204,675 \text{ m} \rightarrow \text{bagian kanan}$$

$$b = 12/2 = 6 \text{ m} \rightarrow \text{bagian kanan}$$

$$\alpha_1 = 86^\circ = \alpha_1 \times \frac{2\pi}{360} = 86 \times \frac{2 \times 3,14}{360^\circ}$$

$$= 1,50 \rightarrow \text{bagian kanan}$$

$$\alpha_2 = 4^\circ = \alpha_2 \times \frac{2\pi}{360} = 4 \times \frac{2 \times 3,14}{360^\circ}$$

$$= 0.070 \rightarrow \text{bagian kanan}$$

$$a = 211,381 \text{ m} \rightarrow \text{bagian kiri}$$

$$b = 6 \text{ m} \rightarrow \text{bagian kiri}$$

$$\alpha_1 = 85^\circ = \alpha_2 \times \frac{2\pi}{360} = 86 \times \frac{2 \times 3,14}{360^\circ}$$

$$= 1,483 \rightarrow \text{bagian kiri}$$

$$\alpha_2 = 4^\circ = \alpha_2 \times \frac{2\pi}{360} = 4 \times \frac{2 \times 3,14}{360^\circ}$$

$$= 0.070 \rightarrow \text{bagian kiri}$$

### Pengaruh bagian kanan

$$\frac{a}{z} = \frac{204,675}{0} = \sim$$

$$\frac{b}{z} = \frac{6}{0} = \sim$$

$$I_1 = \frac{1}{\pi} \left[ \left( \frac{a+b}{a} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{b}{a} \alpha_2 \right]$$

$$I_1 = 0.514$$

### Pengaruh bagian kiri

$$\frac{a}{z} = \frac{211,381}{25} = 8,46$$

$$\frac{b}{z} = \frac{6}{25} = 0,24$$

$$I_2 = \frac{1}{\pi} \left[ \left( \frac{a+b}{a} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{b}{a} \alpha_2 \right]$$

$$I_2 = 0.508$$

### Tegangan vertikal

$$\sigma_z = (I_1 + I_2)q$$

$$= 2074.069 \text{ kN/m}^2$$

**Tabel 3.** Perhitungan Tegangan Vertikal

Z (m)	I <sub>1</sub> (Kanan)		I <sub>2</sub> (kiri)		σ <sub>z</sub> =(I <sub>1</sub> +I <sub>2</sub> ).q (kN/m <sup>2</sup> )
	Hitungan	Grafik	Hitungan	Grafik	
0	0.514	-	0.508	-	2074.069
5	0.508	-	0.502	-	2050.866
10	0.491	-	0.491	-	1993.504
15	0.486	-	0.479	-	1958.705
20	0.480	-	0.474	-	1935.502
25	0.468	0.47	0.468	0.48	1900.692
30	0.463	0.67	0.457	0.459	1865.893

Jadi dari hasil perhitungan tegangan vertikal pada setiap kedalaman, maka diambil tegangan vertikal terjadi pada pondasi as *main dam* diambil nilai  $\sigma_z$  yang paling besar pada  $z = 0$  m adalah sebagai berikut :

$$\sigma_z = (I_1 + I_2)q$$

$$= 2074.069 \text{ kN/m}^2$$

Pondasi pada *riverbed* Bendungan Tugu memiliki kelas batuan CM – CH. Dengan kelas batuan CM – CH, menurut tabel kelas batuan yang dikeluarkan *Central Research Institute of Electric Power Industry Japan* memiliki nilai  $q_u = qu = 1000 - 5000 \text{ kN/m}^2$ . Karena nilai  $qu$  masih lebih besar daripada tegangan vertikal (2074,069 kN/m<sup>2</sup>) yang bekerja pada pondasi akibat beban dari tubuh bendungan, maka batuan pondasi bendungan dianggap memenuhi sebagai tumpuan.

### Perbaikan Pondasi Bendungan Tugu

Ditinjau dari hasil investigasi geologi pondasi bendungan (RQD dan jenis batuan), *Water Pressure Test* serta analisa debit rembesan sebelum perbaikan pondasi dapat disimpulkan bahwa pondasi Bendungan Tugu diperlukan perbaikan (*treatment*). Perbaikan pondasi Bendungan Tugu direncanakan dengan menggunakan dinding halang beton plastis (*plastic concrete cut off wall*) dan grouting yang meliputi *curtain*, *sub curtain* dan *consolidation grouting*.

### Plastic Concrete Cut Off Wall

Penggunaan *plastic concrete cut off wall* (dinding halang beton plastis) dengan tujuan memperpanjang garis rembesan sehingga debit rembesan kecil pada yang melewati lapisan pondasi yang porous (endapan alluvial, kolovial dan batuan lapuk). Perbaikan pondasi dengan *plastic concrete cut off wall* akan memperkecil volume galian pada pondasi bendungan, tidak memerlukan *dewatering* dan mempercepat pelaksanaan konstruksi.

### Kedalaman Plastic Concrete Cut Off Wall

*Plastic concrete cut off wall* direncanakan hanya berada di dasar karena pertimbangan kemudahan pelaksanaan (*workability*) dan kedalaman endapan alluvial kolovial terdalam dengan volume yang besar berada di dasar sungai. Perencanaan kedalaman *plastic concrete cut off wall* dilakukan dengan pertimbangan kondisi geologi pondasi Bendungan Tugu. Berdasarkan hasil analisa tegangan vertikal Bendungan Tugu dan kelas massa batuan, maka direncanakan pondasi Bendungan Tugu harus bertumpu pada batuan dengan kelas CM – CH. Berdasarkan pertimbangan kondisi tersebut maka kedalaman *plastic concrete cut off wall* direncanakan menyesuaikan kedalaman batuan kelas CM - CH dengan variasi kedalaman 5 – 18 m.

### Material Plastic Concrete Cut Off Wall

*Plastic concrete cut off wall* yang memiliki kekuatan 1,0 – 3,0 Mpa memang tidak cocok digunakan untuk pondasi bendungan dengan fungsi utama sebagai struktur (kemampuan menahan beban timbunan) sehingga penggunaan *plastic concrete* ditujukan untuk memperbaiki tingkat permeabilitas pada zona porous. Tingkat deformasi yang tinggi dan tahan terhadap rengangan sampai 10 % tanpa retak juga menjadi pertimbangan penting dalam pemilihan *plastic concrete* untuk pondasi pada bendungan urugan yang sangat memungkinkan terjadi penurunan atau deformasi dari timbunan sehingga ketika terjadi penurunan pada timbunan maka pondasi *plastic concrete* dapat menyesuaikan dengan penurunan yang terjadi pada bendungan dan podasi tidak merusak zona inti.

Tipe *plastic concrete cut off wall* yang digunakan pada Bendungan Tugu dengan campuran semen, bentonit, air, pasir, dan agregat sebagai bahan betonnya. Komposisi (takaran) untuk pembuatan campuran *plastic*

*concrete cut of wall* per satu meter kubiknya direncanakan dengan referensi standar yang ada pada pedoman dinding halang pada bendungan urugan. Komposisi dan parameter deasain hasil pengujian *plastic concrete cut of wall* adalah sebagai berikut:

**Tabel 4.** Komposisi *Plastic Concrete Cut Of Wall*

No	Material	Proporsi Material	Banyaknya Material
		(Kg)	(%)
1	Semen Portland Tipe I	190	8.38
2	Air	310	13.66
3	Pasir	840	37.03
4	Bentonite	18.6	0.82
5	Batu Pecah Halus 1-2 cm	546	24.07
6	Batu Pecah Halus 2-3 cm	364	16.05
Total		2268.6	100

Sumber: Laporan Pengujian Beton Plastis (2017)

**Tabel 5.** Parameter Desain dan Hasil Pengujian *Plastic Concrete Cut Of Wall*

No	Jenis Uji	Spesifikasi	Hasil Uji	Unit
1	Kuat Tekan ( <i>P</i> )	1,0 – 3,0	1,81	Mpa
2	Slump ( <i>SL</i> )	150 – 255	210	Mm
3	Elastisitas ( <i>E</i> )	263 – 351	271,6	Mpa
4	Permeabilitas ( <i>k</i> )	10 <sup>-9</sup>	8.2 x 10 <sup>-10</sup>	m/s

Sumber: Laporan Pengujian Beton Plastis (2017)

### Analisa Stabilitas Lubang *Plastic Concrete Cut Off Wall*

Dalam analisa stabilitas dari lubang *plastic concrete cut off wall*, ada beberapa factor yang dipertimbangkan yaitu: kedalaman lubang, kondisi muka larutan bentonite, dan kondisi muka air tanah. Besarnya stabilitas lubang *plastic concrete cut off wall* dipengaruhi oleh kepekatan campuran bentonite dan air yang diberikan pada penggalian lubang dilaksanakan. Besarnya kepekatan dipengaruhi berat jenis dari campuran bentonite. Data – data yang adalah sebagai berikut:

$$- \gamma \text{ bentonite} = 1.18 \text{ ton/m}^3 = 11.576 \text{ kN/m}^3$$

$$- \gamma \text{ tanah} = 2,1 \text{ ton/m}^3 = 20.601 \text{ kN/m}^3$$

$$- \phi \text{ tanah} = 29^\circ$$

Contoh perhitungan stabilitas lubang pada kedalaman lubang 5 meeter

$$P = \frac{1}{2} \cdot \gamma \text{ bentonite} \cdot (n \cdot H)^2$$

$$P = \frac{1}{2} \times 11.576 \times (5)^2 = 144.698 \text{ kN/m}$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{soil} \cdot H^2 \cdot \cos \alpha$$

$$W = \frac{1}{2} \times 20.601 \times (5.2)^2 \times \cos (59.5)$$

$$= 141.362 \text{ kN/m}$$

Syarat aman stabilitas lubang *plastic concrete cut off wall*  $P > W$ , maka  $144.698 \text{ kN/m} > 141.362 \text{ kN/m}$  kondisi Aman.

**Tabel 6.** Perhitungan Stabilitas Longsor Lubang *Cut Off Wall*

Kedalaman (nH)	P	W	U	W total	Kondisi
(m)	kN/m	kN/m	kN/m		
5	144.7	141.4	-	141.4	Aman
10	578.8	543.9	-	543.9	Aman
15	1302.3	1207.9	5.7	1213.5	Aman
18	1875.3	1731.7	22.8	1754.5	Aman
20	2315.2	2133.2	34.2	2167.3	Aman
25	3617.4	3319.9	62.6	3382.5	Aman

Jadi dapat disimpulkan bahwa pada dinding lubang pengeboran *plastic concrete cut off wall* pada kedalaman 0 – 25 m menggunakan bentonite dengan berat jenis  $1.18 \text{ ton/m}^3$  tidak akan terjadi longsor (aman) pada dinding – dinding bekas pengeboran.

### Grouting Bendungan Tugu

Grouting terdiri dari pengeboran garis atau garis dari lubang bor ke dasar bendungan dan menginjeksi dengan tekanan bubuk semen ke dalam tanah dan batuan pondasi. Grouting berfungsi untuk:

- Mengurangi kebocoran yang melalui pondasi bendungan.
- Mengurangi potensi erosi rembesan.
- Memperkuat pondasi bendungan dan mengurangi *settlement* pada pondasi.

Grouting pondasi Bendungan Tugu dengan inti tegak diambil 3 jenis:

- *Curtain Grouting*
- *Sub Curtain Grouting*
- *Consolidation Grouting*

### Curtain dan Sub Curtain Grouting

*Curtain Grouting* direncanakan untuk menciptakan sebuah penghalang tipis (tirai) yang melalui daerah permeabilitas relatif tinggi. Biasanya terdiri lebih dari satu baris lubang grouting yang dibor dan digrouting ke dasar batuan yang relatif *permeable*, sehingga gradien hidrolik diterima tercapai.

*Sub Curtain Grouting* direncanakan dengan fungsi untuk membuat jalur rembesan,

sehingga ketika *curtain grouting* dilaksanakan *net cement* tidak akan menyebar ke daerah yang tidak diinginkan yang berada di hulu dan hilir *Curtain Grouting* sehingga keberhasilan dari *curtain grouting* akan lebih mudah tercapai. Biasanya terdiri dari satu baris lubang grouting yang dibor dan digrouting ke dasar batuan yang relatif *permeable*, sehingga gradien hidrolik diterima tercapai.

Untuk mengetahui kedalaman *curtain grouting* pada pondasi Bendungan Tugu didasarkan rumus empiris, contoh pada Sta. 10 seperti berikut:

$$h = 93.85 \text{ m} \rightarrow \text{Sta 10}$$

$$C = 10.5 \text{ m} \rightarrow \text{didasarkan sungai setelah digali}$$

$$D = \frac{1}{3} \times h + C$$

$$D = \frac{1}{3} \times 93.85 + 10,5$$

$$D = 41.8 \text{ m}$$

**Tabel 7.** Kedalaman *Curtain Grouting*

Sta	H Bendungan	C	D Grouting (m)
-1	12.79	10.5	14.8
0	20.79	10.5	17.4
1	26.68	10.5	19.4
2	32.011	10.5	21.2
3	69.451	10.5	33.7
4	69.451	10.5	33.7
5	83.67	10.5	38.4
6	89.85	10.5	40.5
7	90.85	10.5	40.8
8	91.85	10.5	41.1
9	92.85	10.5	41.5
10	93.85	10.5	41.8
11	93.04	10.5	41.5
12	84.99	10.5	38.8
13	78.34	10.5	36.6
14	73.59	10.5	35.0
15	44.85	10.5	25.5
16	29.25	10.5	20.3
17	27	10.5	19.5

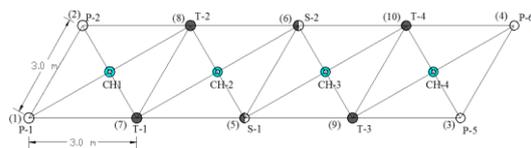
Sumber: Hasil Perhitungan

Untuk perencanaan kedalaman *sub curtain grouting* direncanakan dengan kedalaman 15 m pada Sta 0 – Sta 17. Perencanaan kedalaman *sub curtain grouting* dengan mempertimbangan fungsi utamanya untuk membuat jalur rembesan, sehingga ketika *curtain grouting* dilaksanakan *net cement* tidak akan menyebar

kedaerah yang tidak diinginkan dan meningkatkan efektivitas / keberhasilan dinding halang beton plastis dan *curtain* grouting dalam mengurangi debit rembesan.

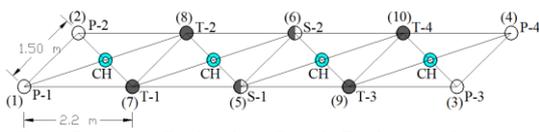
### Pola Curtain dan Sub Curtain Grouting

*Curtain* dan *sub curtain* grouting dilaksanakan di sandaran kiri (Sta. 6 - Sta. -1 *curtain* & Sta. 6 - Sta. 0 *sub curtain*), dasar (Sta. 6 - Sta. 11) dan sandaran kanan sungai (Sta. 11 - Sta. 17). Pola grouting (jarak lubang) direncanakan berdasarkan pekerjaan *trial grouting* yang dilaksanakan sebelumnya. Pada kondisi geologi pondasi Bendungan Tugu dijumpai rekahan – rekahan batuan yang cukup lebar dan dalam pelaksanaan grouting cukup susah menafsirkan sebaran dari grouting pada pondasi. Berdasarkan kondisi tersebut *curtain* grouting direncanakan dalam 2 baris dengan metode pisah spasi atau *split spacing*. Grouting pada baris terluar dikerjakan lebih awal dengan tujuan memberikan batasan grouting dan meningkatkan efektivitas grouting pada lubang baris berikutnya (tengah) atau barisan spasi final untuk mengisi rekahan yang lebih halus dengan tekanan yang lebih tinggi. Sedangkan untuk *sub curtain* grouting direncanakan dalam 1 baris yang berada diantara *curtain* grouting dan konsolidasi grouting dengan metode *split spacing*. Pola dan lokasi *curtain* dan *sub curtain* grouting direncanakan seperti dibawah.



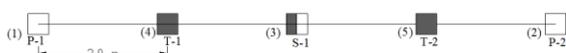
**Gambar 3.** Pola dan Jarak Lubang *Curtain* Grouting 2 Baris dengan Metode *Split Spacing* Sandaran Kiri dan Kanan

Sumber: Hasil Perencanaan



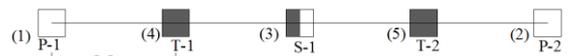
**Gambar 4.** Pola dan Jarak Lubang *Curtain* Grouting 2 Baris dengan Metode *Split Spacing* Dasar Sungai

Sumber: Hasil Perencanaan



**Gambar 5.** Pola dan Jarak Lubang *Sub Curtain* Grouting 1 Baris dengan Metode *Split Spacing* Sandaran Kiri dan Kanan

Sumber: Hasil Perencanaan



**Gambar 6.** Pola dan Jarak Lubang *Sub Curtain* Grouting 1 Baris dengan Metode *Split Spacing* Dasar Sungai

Sumber: Hasil Perencanaan

Keterangan :

P = Lubang Primer

S = Lubang Sekunder

T = Lubang Tersier

CH = *Check hole*

1,2,3 ... = Urutan Pelaksanaan

### **Consolidation Grouting**

*Consolidation Grouting* Berfungsi merekondisi struktur batuan pondasi yang mengalami kerusakan waktu digali, baik dengan alat besar ataupun dengan peledakan. Meningkatkan kekuatan geser batuan yang jelek, hancur dan berkekar. Kedalaman grouting bervariasi dari 5 m hingga 15 m dan spasi dari 5 m hingga 2,5 m dalam sistim grid.

Untuk mengetahui apakah pondasi pada Bendungan Tugu perlu dilakukan perbaikan pondasi berupa *consolidation grouting*, adalah dengan memperkirakan kelas pelapukan batuan dengan nilai RQD yang terdapat pada pondasi. Dari data borlog untuk Bendungan Tugu pada kedalaman 0 – 10 m rata – rata memiliki nilai RQD sebagai berikut:

- *Left Bank* = 49.72 % (*Poor*) (*Moderately Soft*)
- *Riverbed* = 44.17 % (*Poor*) (*Moderately Soft*)
- *Right Bank* = 35.00 % (*Poor*) (*Moderately Soft*)

Dari beberapa analisa kondisi kualitas batuan dan kekerasan batuan diatas dapat dikatakan bahwa pondasi Bendungan Tugu diperlukan pekerjaan perbaikan pondasi berupa konsolidasi grouting pada sandaran kiri (Sta. 0 – Sta. 6), dasar sungai (Sta. 6 – Sta. 11), dan sandaran kanan (Sta. 11 – Sta. 17) yang berfungsi untuk:

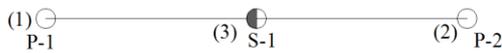
1. Menutup celah, rekahan atau sesar yang terdapat pada pondasi tersebut.
2. Menaikkan nilai *qu* batuan pondasi agar dapat menahan beban tubuh bendungan itu sendiri.
3. Menambah modulus deformasi batuan pada pondasi untuk mengurangi besarnya penurunan yang terjadi akibat beban tubuh bendungan itu sendiri.

Berdasarkan Pedoman grouting Untuk Bendungan dan Buku Bendungan Tipe Urugan,

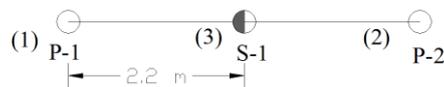
kedalaman dari konsolidasi grouting berkisar antara 5 – 10 m tergantung kondisi batuan pondasi. Berdasarkan kondisi geologi pondasi Bendungan Tugu yang ditinjau dari hasil RQD disimpulkan bahwa pada kedalaman 0 – 10 m pondasi bendungan merupakan batuan lunak yang memiliki banyak celah atau rekahan, sehingga kedalaman konsolidasi grouting direncanakan sedalaman 10 m.

### **Pola Consolidation Grouting**

Konsolidasi grouting dilaksanakan di sandaran kiri (Sta. 0 - Sta. 6), dasar (Sta. 6 - Sta. 11) dan sandaran kanan sungai (Sta. 11 - Sta. 17). Pola grouting (jarak lubang) direncanakan berdasarkan pekerjaan *trial* grouting yang dilaksanakan sebelumnya. Konsolidasi grouting direncanakan berada dibawah tubuh bendungan sepanjang zona inti dan merupakan grouting paling luar. Pelaksanaan konsolidasi grouting direncanakan dalam dengan metode pisah spasi atau *split spacing*. Grouting pada baris terluar dikerjakan lebih awal dengan tujuan memberikan batasan grouting dan meningkatkan efektifitas grouting pada lubang baris berikutnya (tengah) atau barisan spasi final untuk mengambil mengisi rekahan yang lebih halus dengan tekanan yang lebih tinggi. Pola dan lokasi konsolidasi grouting direncanakan seperti dibawah.



**Gambar 7.** Pola dan Jarak Lubang Konsolidasi Grouting dengan Metode *Split Spacing* Sandara Kiri dan Kanan Sungai  
Sumber: Hasil Perencanaan



**Gambar 8.** Pola dan Jarak Lubang Konsolidasi Grouting dengan Metode *Split Spacing* Dasar Sungai  
Sumber: Hasil Perencanaan

Keterangan :

P = Lubang Primer

S = Lubang Sekunder

T = Lubang Tersier

CH = *Check hole*

1,2,3 ... = Urutan Pelaksanaan

### **Analisa Rembesan Bendungan Tugu Setelah Perbaikan Pondasi**

Dalam analisa rembesan SEEP/W 2007 dilakukan dengan 3 skenario dengan tujuan

untuk membuktikan bahwa terjadi penurunan debit rembesan dari skenario I sampai skenario III yang merupakan perbaikan pondasi sesuai hasil perencanaan. Skenario tersebut yakni:

- 1) Dinding halang beton plastis kombinasi *curtain* grouting.
- 2) Dinding halang beton plastis, *curtain* grouting kombinasi dengan *sub curtain* grouting.
- 3) Dinding halang beton plastis, *curtain*, *sub curtain* grouting kombinasi dengan konsolidasi grouting.

Berikut merupakan nilai debit rembesan hasil analisa SEEP/W 2007 pada kondisi Muka Air Normal (MAN) dengan bentang bendungan 475 m dari 3 skenario perbaikan pondasi:

Sebelum perbaikan pondasi =  $0.034 > 1\% Q$  rerata sungai

Skenario I =  $0.0105 \text{ m}^3/\text{dt} < 1\% Q$  rerata sungai

Skenario II =  $0.005 \text{ m}^3/\text{dt} < 1\% Q$  rerata sungai

Skenario III =  $0.001 \text{ m}^3/\text{dt} < 1\% Q$  rerata sungai

Sehingga, dapat disimpulkan bahwa pada kondisi sebelum perbaikan pondasi terjadi debit rembesan yang cukup besar ( $Q > 1\% Q$  rerata sungai) dan dinyatakan dalam kondisi tidak aman. Dari kondisi tersebut menunjukkan bahwa perlu dilakukan *treatment* pondasi untuk mengurangi debit rembesan. Pada setiap skenario (skenario I, II dan III) *treatment* perbaikan pondasi didapatkan bahwa debit rembesan yang terjadi  $< 1\%$  debit rerata sungai sehingga dinyatakan bahwa kapasitas rembesan yang terjadi pada pondasi dan tubuh Bendungan Tugu masih memenuhi dari syarat yang ditetapkan (aman).

### **Evaluasi Hasil Analisa Rembesan**

Evaluasi ini perlu dilakukan dengan tujuan untuk melihat keamanan bendungan terhadap rembesan dan mengetahui tingkat keberhasilan dari *treatment* perbaikan pondasi. Parameter keberhasilan grouting dapat ditinjau dari nilai Lu (debit rembesan), mencegah bahaya akibat rembesan (*piping / uplift*), dan *workability* (kemudahan untuk dikerjakan).

#### **a) Efektivitas Grouting**

Permeabilitas air dapat diambil dari koefisien lulusan air (K) atau nilai Lugeon (Lu). Dalam menentukan efektivitas geouting diambil dari koefisien permeabilitas / nilai Lugeon pada *pilot hole* dibandingkan dengan koefisien permeabilitas / nilai Lugeon (Lu) pada

check hole yang berdekatan dan dari hasil analisa rembesan dengan SEEP/W 2007 sebelum dan setelah perbaikan pondasi. Efektivitas grouting digolongkan sebagai berikut

**Tabel 8. Efektivitas dan Pengaruh Grouting**

Efektivitas Grouting (%)	Pengaruh Grouting
> 90	Sangat Baik
60 – 90	Baik
30 – 60	Sedang
10 – 30	Kurang
< 10	Buruk

Sumber: Pedoman Grouting Untuk Bendungan (2005:171)

Contoh Perhitungan Efektivitas Grouting:

Pada skenario III kondisi MAN

$$E_{fs} = 100 - (KG/K) \times 100$$

$$E_{fs} = 100 - (0.001007/0.03629) \times 100 = 97.08 \%$$

**Tabel 9. Rekapitulasi Efektivitas Perbaikan Pondasi dengan Analisa SEEP/W**

Skenario	Bentang Bendungan	Rembesan	Efektivitas
	(m)	(m <sup>3</sup> /det)	(%)
Sebelum Grouting	475	0.03629	-
	475	0.034447	-
	475	0.018525	-
	Rata - Rata	0.029754	-
I	475	0.0109725	69.76
	475	0.0104975	69.53
	475	0.0059375	67.95
	Rata - Rata	0.009135833	69.30
II	475	0.004845	86.65
	475	0.0045885	86.68
	475	0.002698	85.44
	Rata - Rata	0.004043833	86.41
II	475	0.00106875	97.05
	475	0.001007	97.08
	475	0.0005225	97.18
	Rata - Rata	0.000866083	97.09

Dari hasil perhitungan efektivitas perbaikan pondasi berdasarkan debit rembesan sebelum dan setelah perbaikan pondasi dari analisa rembesan SEEP/W 2007 didapatkan bahwa efektivitas rata – rata untuk perbaikan pondasi dengan metode *plastic concrete cut off wall*, konsolidasi grouting, *sub curtain grouting* dan *curtain grouting* adalah 97.09 %. Menurut pedoman grouting dengan efektivitas grouting mencapai 97.09 % termasuk dalam kategori pengaruh yang sangat baik.

### b) Kecepatan Aliran Filtrasi

Kecepatan rembesan (Vs) diambil dari result SEEP/W pada kondisi MAN dengan pertimbangan MAN yang merupakan kondisi maksimum tumpungan air waduk (tumpungan

efektif) dengan nilai sebesar  $2.76 \times 10^{-7}$  m/dt atau  $2.76 \times 10^{-5}$  cm/dt.

### Kecepatan Kritis (Vc)

$$V_c = \frac{\sqrt{W1 \times g}}{F \times \gamma_w}$$

Nilai W1

$$W1 = (Gs-1) \times 0.167 \times \pi \times d^3$$

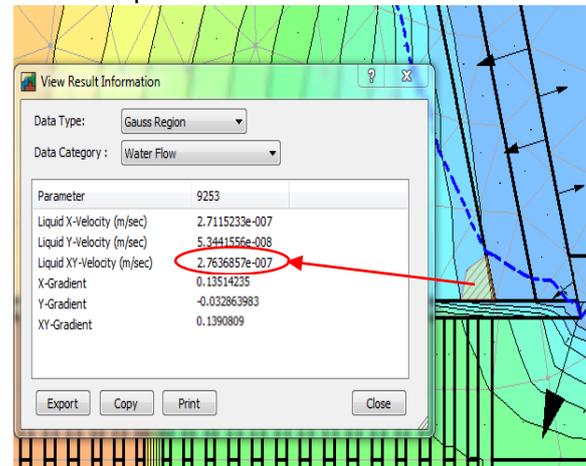
$$W1 = (2.665-1) \times 0.167 \times 3.14 \times 0.001^3$$

$$W1 = 8.73 \times 10^{-10}$$

Nilai F

$$F = \frac{\pi}{4} \times d^2$$

$$F = \frac{3.14}{4} \times 0.001^2 = 7.85 \times 10^{-7}$$



**Gambar 9.** Detail Vektor Kecepatan Aliran pada Tumit Hilir

Sumber: Hasil Analisa

Sehingga, kecepatan kritis dapat diperoleh dengan :

$$V_c = \frac{\sqrt{W1 \times g}}{F \times \gamma_w}$$

$$V_c = \frac{\sqrt{8.73 \times 10^{-10} \times 980}}{7.85 \times 10^{-7} \times 1}$$

$$V_c = 1.044 \text{ cm/dt}$$

Karena kecepatan kritis ( $V_c=1.044$  cm/dt) > kecepatan rembesan ( $V_s=2.76 \times 10^{-5}$  cm/dt) dapat dikatakan tidak akan terjadi peristiwa *piping* dan *boiling*.

### c) Perhitungan Faktor Keamanan Terhadap Piping

Dalam perhitungan faktor keamanan *piping* ini dipilih keadaan air normal (MAN) di hulu bendungan berada pada elevasi +239.05 m.

#### Gradien Hidraulik Kritis ( $i_{cr}$ )

$$i_{cr} = \frac{(Gs - 1)}{(1 + e)}$$

$$i_{cr} = \frac{(2,665 - 1)}{(1 + 1.122)} = 0.785$$

### Gradien Hidraulik Exit ( $i_{cat}$ )

Didapatkan dari *result information* dalam Analisa SEEP/W yang terjadi pada tumit zona inti tubuh bendungan yakni di dapatkan dengan nilai 0.139.

### FK Terhadap Piping

$$FK = \frac{i_{cr}}{i_n}$$
$$FK = \frac{0,785}{0,139} = 5.645$$

Didapatkan hasil perhitungan faktor keamanan terhadap *piping* ( $FK = 5.645 > 4$ ) maka, dapat dikatakan tidak akan terjadi peristiwa *piping*.

### **Analisa Deformasi Bendungan dengan SIGMA/W 2007**

Analisis deformasi ini dilakukan untuk mengetahui besarnya penurunan dari konstruksi bendungan pada saat konsolidasi telah tercapai 90 %. Parameter yg diperlukan dalam analisis deformasi ini adalah besarnya nilai modulus elastisitas (E) serta angka poisson ( $\nu$ ) dari setiap zona material.

#### **a) Deformasi Tubuh Bendungan dan Pondasi**

Hasil dari analisa deformasi tubuh bendungan dan pondasi Bendungan Tugu didapatkan bahwa deformasi maksimum yg terjadi adalah sebesar 1.098 m atau 109.89 cm yang terjadi pada zona inti bagian atas. Untuk mengetahui waktu penurunan yang terjadi sebesar 1.099 m pada zona inti dihitung dengan rumus:

Diketahui:

$$H = 93.85 \text{ m (9385 cm)}$$

$$C_v = 6.61 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{dt}$$

Derajat konsolidasi (U) 90%

Maka waktu penurunannya:

$$t = \frac{T_{90\%} \times H^2}{C_v}$$

$$t = \frac{0.848 \times 9385^2}{6.61 \times 10^{-3}}$$

$$t = 358.31 \text{ tahun}$$

#### **b) Deformasi Pada Area Dinding Halang**

Lapisan pondasi endapan kollovial dan batuan lapuk kuat (dekompos) mengalami penurunan (*displacement*) maksimum sebesar 25.40 cm, sementara dinding halang beton plastis (dinding diafragma) mengalami penurunan sebesar 24.60 cm, sehingga

perbedaan penurunannya sekitar 0.80 cm. Dengan perbedaan penurunan yang kecil ( $< 50$  cm), maka tidak akan membahayakan stabilitas dinding diafragma (terjadi *crack*) dan menjadi jalur rembesan.

Besarnya deformasi vertikal (Y) yang terjadi pada dinding diafragma dengan tinggi 18 m (1800 cm) sebesar 24.6 cm – 17.9 cm = 6.7 cm atau sebesar 0.37% ( $6.7/1800 \times 100\%$ ). Besarnya deformasi tidak mengakibatkan dinding diafragma runtuh (*failure*) karena keruntuhan terjadi bila deformasi sekitar  $> 4\%$ . Sedangkan deformasi horisontal (X) yang terjadi pada dinding diafragma dengan tinggi 18 m sebesar 1,7 – 0.4 cm = 1,3 cm atau sebesar 0.07 % ( $1.3/1800 \times 100\%$ ) sehingga nilai ini sangat kecil dan tidak akan membahayakan stabilitas dinding diafragma.

Berdasarkan hasil tes laboratorium, besarnya Modulus Young dinding diafragma rata-rata dengan kedalaman kollovial 8 m dan batuan lapuk kuat 10 m adalah :

$$E_{dinding} = 420,000 \text{ kN/m}^2$$

Besarnya Modulus Young pondasi kollovial dan batuan dasar lapuk kuat (dekompos) :

$$E_{tanah} = (80,000 * 8 + 100,000 * 10) / (8+10) = 91,111 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Sehingga : } 5 \times E_{tanah} = 5 * 91,111 \text{ kN/m}^2 = 455,556 \text{ kN/m}^2 > E_{dinding} \rightarrow \text{OKE}$$

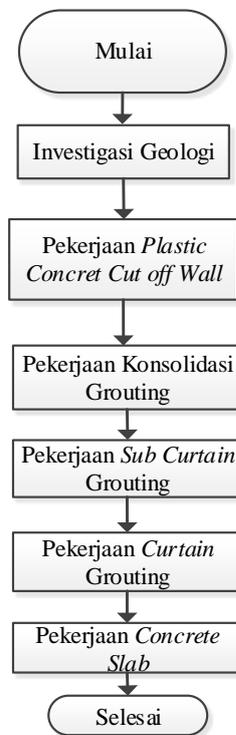
### **Perencanaan Penulangan Concrete Slab**

Beton (*concrete slab*) merupakan material / bahan konstruksi yang memiliki kuat tekan yang tinggi tetapi kuat tariknya rendah. Pada beton diperlukan (kombinasi) tulangan baja yang memiliki kuat tarik yang tinggi agar beton mampu menahan tekan dan tarik pada sebuah konstruksi. Concrete slab direncanakan dengan dimensi tebal beton 1 m dengan panjang 12 m (sama dengan lebar puncak bendungan) yang diletakkan tepat diatas dinding halang beton plastis.

Untuk perhitungan pembetonan dan penulangan concrete slab, konstruksi yang di tinjau adalah beban tubuh, adapun mutu beton yang digunakan yaitu  $f'c = 18,68 \text{ MPa}$  (K-225)  $f_y = 400 \text{ MPa}$  dengan tebal selimut beton  $p = 75 \text{ mm}$ . Diameter tulangan yang digunakan pada *concrete slab* sebesar D22-250 (tulangan utama) dan D19-250 (tulangan bagi).

## Metode Pelaksanaan Konstruksi Perbaikan Pondasi

Perbaikan pondasi pada Bendungan Tugu dilakukan dengan kombinasi *treatment plastic concrete cut off wall* (dinding halang beton plastis) dan grouting yang terdiri dari grouting tirai (*curtain*), *sub curtain*, dan konsolidasi grouting.



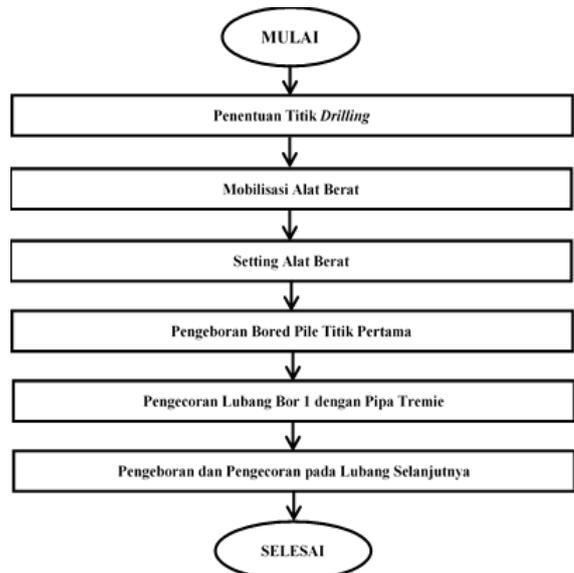
**Gambar 10.** Flowchart Perbaikan Pondasi  
Sumber: Hasil Perencanaan

### a) Plastic Concrete Cut Off Wall (Dinding Halang Beton Plastis)

Lokasi pekerjaan plastic concrete cut off wall berada disepanjang dasar sungai yang terletak pada STA. 6 – STA. 11 dengan lubang bor 2 baris dan setiap lubang bor direncanakan overlap dengan lubang bor yang ada di sebelahnya.

Pengeboran dilakukan menggunakan alat berat *Rotary Drilling Machine* yang sebelumnya telah dipersiapkan. Diameter lubang sebesar 80 cm dengan kedalaman pengeboran  $\pm 10$  meter. Lokasi pengeboran memiliki tipe tanah koluvial yang berupa campuran lempung, pasir, kerikil, kerakal dan *boulder* dari andesit dan breksi, sifat lepas – lepas dan tidak terkonsolidasi yang umumnya tidak stabil. Pengeboran untuk *cut off wall* dilakukan dengan selang antar pusat bor sebesar 55 cm. Sedangkan pengeboran untuk lubang ketiga berada dianantara lubang pertama dan

kedua yang telah di cor dengan beton – bentonite.



**Gambar 11.** Flowchart Pekerjaan Drilling, Casting dan Pengeboran  
Sumber: Hasil Perencanaan

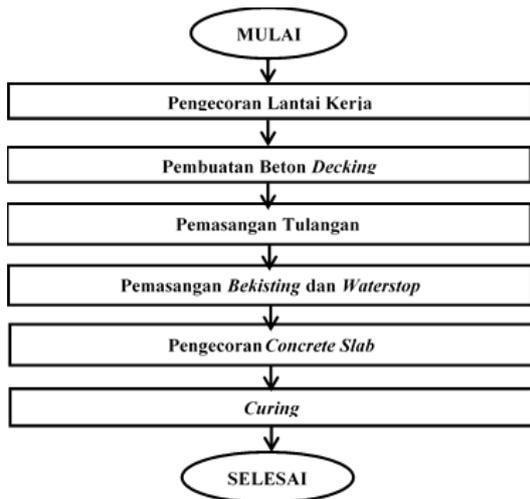
### b) Pelaksanaan Grouting

Pekerjaan grouting terdiri dari *curtain grouting*, *sub curtain grouting*, dan *consolidation grouting*. Pekerjaan grouting akan dilakukan dengan tahapan 5 m (1 *stage*) panjang lubang grouting, dan menggunakan cara *split spacing method*. Grouting dilakukan pada *stage* yang mempunyai nilai  $Lu > 3$ . Kedalaman tahap akhir tidak boleh lebih dari 7,5 m. Tahapan grouting di tiap lubang akan dilakukan dengan *down hole stage* (grouting dari atas ke bawah).

Setiap pekerjaan pengeboran akan dibor dengan peralatan pengeboran *rotary* dan perkusi standard dan dilengkapi dengan *water swivel* atau alat lainnya untuk penggelontoran lubang secara berkelanjutan. Diameter lubang bor yang akan dipakai adalah ukuran  $\varnothing 56$  mm. Untuk pekerjaan *pilot holes* dan *test holes* diameter lubang adalah  $\varnothing 73$  mm dan harus di ambil sampel inti. Untuk mata bor yang digunakan adalah  $\varnothing 73$  mm dengan *double core*.

### c) Pelaksanaan Concrete Slab

Pekerjaan *concrete slab* berada di atas gouting dan dinding halang beton plastis. *Concrete slab* dikerjakan setelah pekerjaan grouting dan dinding halang selesai.



**Gambar 12.** Flowchart Pekerjaan Concrete Slab

Sumber: Hasil Perencanaan

### Rencana Anggaran Biaya

Volume pekerjaan yang dihitung ini berdasarkan perencanaan yang telah dilakukan pada pekerjaan ini. Perhitungan luas bidang bangunan dilakukan menggunakan program AutoCAD dan dengan bantuan program MS. Excel. Volume untuk pekerjaan *plastic concrete cut off wall*, grouting dan *concrete slab* sebagai berikut:

**Tabel 10.** Volume Pekerjaan Perbaikan Pondasi

NO	URAIAN PEKERJAAN	Sat	VOLUME
<b>1.1</b>	<b>Water Pressure Test (WPT)</b>		
1	Pemasangan Pipa Pelindung	m	41,594.29
2	Penyiapan dan Pemasangan Packer	Kali	2,918.00
3	Single Water Pressure Test	Kali	2,785.00
4	Multii Water Pressure Test	Kali	133.00
<b>1.1</b>	<b>Grouting</b>		
1	Pemboran Lubang <i>Curtain Grouting</i>	m	11,635.86
2	Pemboran Inti <i>Pilot Hole &amp; Check hole</i>	m	3,783.43
3	Pemboran <i>Sub Curtain Grouting</i>	m	4,965.00
4	Pemboran Konsolidasi Grouting	m	21,210.00
5	Material Grouting	ton	7,219.06
6	Pelaksanaan Grouting	ton	7,219.06
<b>1.2</b>	<b>Plastic Concrete Cut Off Wall</b>		
1	Pemboran Bore Pile di Tanah	m	3,128.50
2	Pemboran Bore Pile di Batu	m	4,337.50
3	Beton Plastis	m <sup>3</sup>	5,972.80
<b>1.3</b>	<b>Concrete Slab</b>		
1	Beton K-225	m <sup>3</sup>	1,500.00
2	Tulangan Beton (pemotongan, pembengkokan dan pemasangan)	Ton	40.01
3	Bekisting Tipe <i>Non Expose F1</i>	m <sup>2</sup>	137.00

Harga total seluruh pekerjaan merupakan jumlah dari hasil perkalian volume pekerjaan atau *bill of quantity* (BOQ) dengan harga satuan pekerjaan untuk masing-masing pekerjaan. Untuk mendapatkan rencana anggaran biaya (RAB), harga total seluruh pekerjaan tersebut ditambah dengan pajak pertambahan nilai (PPN) yang besarnya 10% dari harga total seluruh pekerjaan.

Jadi dari hasil perhitungan RAB disimpulkan bahwa biaya yang dibutuhkan untuk pekerjaan perbaikan pondasi Bendungan Tugu adalah Rp.61,626,723,607.87 atau dibulatkan menjadi Rp.61,626,724,000.00 (Enam Puluh Satu Miliar Enam Ratus Dua Puluh Enam Juta Tujuh Ratus Dua Puluh Empat Ribu Rupiah).

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Berdasarkan analisa perhitungan yang sudah dilakukan dan rumusan masalah yang ada pada studi ini, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- Berdasarkan kajian dari hasil investigasi geologi, *Water Pressure Test* dan trial grouting pada sandaran kiri, dasar dan sandaran sungai dengan mempertimbangkan efektivitas grouting serta sebarannya dengan cairan kimia fenolftalein, maka didapatkan pola (jarak / spasi) grouting sebagai berikut:
  - Pada sandaran kiri: direncanakan grouting (*curtain*, *sub curtain* dan konsolidasi) dengan jarak 3 x 3 m. Dari hasil *Water Pressure Test* (WPT) pada sandaran kiri dengan jarak 3 x 3 m didapatkan efektivitas grouting 66.44 % (pengaruh grouting baik) dan ketika diberikan cairan kimia fenolftalein pada lubang *check hole*, cairan tersebut berubah menjadi warna merah (sebaran grouting terinterkoneksi).
  - Pada dasar sungai: direncanakan grouting (*curtain*, *sub curtain* dan konsolidasi) dengan jarak 2.2 x 1.5 m. Dari hasil *Water Pressure Test* (WPT) pada sandaran kiri dengan jarak 2.2 x 1.5 m didapatkan efektivitas grouting 61.50 % (pengaruh grouting baik) dan ketika diberikan cairan kimia fenolftalein pada lubang *check hole*, cairan tersebut berubah menjadi warna merah (sebaran grouting terinterkoneksi).
  - Pada dasar sungai: direncanakan grouting (*curtain*, *sub curtain* dan konsolidasi) dengan jarak 2.2 x 1.5 m. Dari hasil *Water Pressure Test* (WPT) pada sandaran kiri

- dengan jarak  $2.2 \times 1.5$  m didapatkan efektivitas grouting 61.50 % (pengaruh grouting baik) dan ketika diberikan cairan kimia fenoltalein pada lubang *check hole*, cairan tersebut berubah menjadi warna merah (sebaran grouting terinterkoneksi).
2. Analisa rembesan pada tubuh dan pondasi bendungan dilakukan menggunakan program Geostudio SEEP/W 2007 dengan melakukan beberapa skenario *treatment* perbaikan pondasi dengan tujuan membuktikan bahwa terjadinya penurunan debit rembesan pada skenario sebelum perbaikan pondasi sampai perbaikan pondasi sesuai perencanaan.
 

Sebelum perbaikan pondasi =  $0.034 > 1\% Q$  rerata sungai

Skenario I =  $0.0105 \text{ m}^3/\text{dt} < 1\% \bar{Q}$  sungai

Skenario II =  $0.005 \text{ m}^3/\text{dt} < 1\% \bar{Q}$  sungai

Skenario III =  $0.001 \text{ m}^3/\text{dt} < 1\% \bar{Q}$  sungai
  3. Analisa stabilitas tubuh bendungan dan pondasi yang meliputi stabilitas terhadap daya dukung (kemampuan pondasi), stabilitas longsor pada dinding lubang bor *plastic concrete cut off wall*, rembesan dan deformasi Bendungan Tugu didapatkan hasil sebagai berikut:
    - a. Tegangan vertikal bendungan yang paling besar berada pada kedalaman 0 m dari dasar tubuh bendungan dengan nilai  $2074,069 \text{ kN/m}^2 < 5000 \text{ kN/m}^2$  (CM – CH), sehingga pondasi bendungan memenuhi sebagai tumpuan (pondasi) bendungan.
    - b. Perhitungan stabilitas longsor pada bor lubang *plastic concrete cut off wall* dengan berat jenis bentonite  $1.18 \text{ ton/m}^3$  didapat bahwa tekanan bentonite  $>$  tekanan tanah pada kedalaman 0-25 m, sehingga tidak terjadi longsor pada tanah bekas lubang bor.
    - c. Dari hasil perhitungan kecepatan kritis didapatkan  $V_c=1.044 \text{ cm/dt} >$  kecepatan rembesan ( $V_s=2.76 \times 10^{-5} \text{ cm/dt}$ ), sehingga dapat dikatakan tidak akan terjadi peristiwa *piping* dan *boiling*. Sedangkan, dari hasil perhitungan faktor keamanan terhadap *piping* dan *boiling* didapat angka keamanan ( $FK=5.645 > 4$ ). Maka, dapat dikatakan tidak akan terjadi peristiwa *piping* atau *boiling*.
    - d. Analisa deformasi dilakukan dengan bantuan program Geostudio SIGMA/W 2007 dengan hasil pada lapisan pondasi endapan kolloidal dan batuan lapuk kuat mengalami penurunan 25.40 cm dan pada dinding halang beton plastis mengalami penurunan 24.60 cm. Sehingga dari hasil tersebut didapatkan perbedaan penurunan  $0.8 \text{ cm} < 50 \text{ cm}$ , maka tidak akan terjadi *crack* pada area dinding halang beton plastis. Pada dinding halang beton plastis dengan tinggi 18 m (1800 cm) terjadi deformasi vertikal (Y) 6.7 cm atau sebesar  $0.37\% < 4\%$ , sehingga tidak akan menimbulkan keruntuhan (*failure*). Sedangkan deformasi horizontal (X) dengan nilai sangat kecil sebesar 1,3 cm atau  $0.07\%$  dan tidak akan membahayakan stabilitas dinding halang.
  4. Metode pelaksanaan perbaikan pondasi dengan kombinasi *plastic concrete cut off wall* dan grouting dilakukan dengan beberapa tahapan diantaranya:
    - Investigasi geologi, untuk mengetahui kondisi geologi pondasi, jenis batuan, dan rembesannya dengan WPT.
    - Pekerjaan untuk *plastic concrete cut of wall*, diawali dengan pengeboran dengan menggunakan *bored pile* diameter 80 cm sedalam 18 m yang dilanjutkan dengan pemasangan *temporary steel casing* diameter 80 cm dengan tinggi 2 – 3 m.
    - Pekerjaan grouting, pekerjaan grouting dimulai dari konsolidasi grouting dilanjutkan *sub curtain* grouting dan *curtain* grouting dengan tujuan agar ketika dilakukan *sub curtain* dan *curtain* grouting penetrasi dan sebaran grouting akan lebih baik. Pengeboran grouting dilakukan dengan metode *down stage* (dari atas ke bawah) dengan tahapan pengeboran (*stage*) setiap kedalaman 5 m. Setiap *stage* akan dilakukan pengujian tekanan air (WPT) untuk mengetahui nilai  $Lu$  dan *stage* yang akan di grouting jika  $Lu > 3$ . Pengeboran untuk grouting dilakukan dengan menggunakan mesin bor *rotary* diameter 73 mm.
    - Pekerjaan *Concrete Slab*, *concrete slab* berada diatas dinding halang dan grouting yang dilakukan setelah pekerjaan dinding halang dan grouting selesai. tahapan pekerjaan *concrete slab* dimulai dari pengecoran lantai kerja, pembuatan beton *decking*, pemasangan tulangan, pemasangan *bekisting dan waterstop*, pengecoran dan *curing*. *Concrete slab* dikerjakan seluas  $12 \times 125$  m (sepanjang dinding halang beton plastis) dengan tebal 1 m.
  5. Dari hasil Rencana Anggaran Biaya (RAB) pekerjaan perbaikan pondasi metode *plastic concrete cut off wall* kombinasi grouting pada Bendungan Tugu didapatkan dengan

biaya sebesar Rp. Rp.61,626,724,000.00 (Enam Puluh Satu Miliar Enam Ratus Dua Puluh Enam Juta Tujuh Ratus Dua Puluh Empat Ribu Rupiah).

#### **Saran**

Pada debit rembesan hasil analisa rembesan pada bendungan dengan program Geostudio SEEP/W 2007 perlu dilakukan validasi dengan menggunakan data hasil pengujian tekanan air dilapangan (WPT). Selain debit rembesan, efektivitas grouting dari hasil SEEP/W juga harus dilakukan validasi dengan efektivitas grouting hasil pengujian lapangan

#### **UCAPAN TERIMAKASIH**

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing yang telah menndampingi dalam pengerjaan skripsi. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada BBWS Brantas, konsultan supervisi Bendungan Tugu (PT. Mettana), dan kontraktor pelaksana (PT. Wijaya Karya) yang telah memberikan keperluan data skripsi, pengetahuan lapangan dan motivasi dalam pengerjaan skripsi.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- Bowles, E. Joseph. (1991). *Analisis dan Desain Pondasi Jilid 1*. Jakarta: Erlangga
- Christady Hardiyatmo, Hary. (2007). *Mekanika Tanah 1 Edisi Keempat*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Christady Hardiyatmo, Hary. (2007). *Mekanika Tanah 2 Edisi Keempat*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Craig, R.F. (1994). *Mekanika Tanah Edisi Keempat*. Jakarta: Erlangga.
- Departement Pekerjaan Umum. (2005). *Pedoman Pengendalian Rembesan Pada Bendungan Urugan*. Jakarta Selatan.
- Departement Pekerjaan Umum. (2005). *Pedoman Grouting Untuk Bendungan*. Jakarta Selatan.
- Departement Pekerjaan Umum. (2005). *Pedoman Pembuatan Dinding Halang (Cut Off) Pada Bendungan Urugan*. Jakarta Selatan.
- Departement Pekerjaan Umum. (2005). *Pedoman Pengendalian Rembesan Pada Bendungan Urugan*. Jakarta Selatan.
- Departement Pekerjaan Umum. (2007). *Pembangunan Bendungan pada Pondasi Tanah Lunak*. Jakarta Selatan.
- Departement Pekerjaan Umum. (2003). *Pedoman Kriteria Umum Desain Bendungan*. Jakarta Selatan.
- Departement Pekerjaan Umum. (2003). *Pedoman Kajian Keamanan Bendungan*. Jakarta Selatan.
- Departement Pekerjaan Umum. (2004). *Pedoman Pelaksanaan Konstruksi Bendungan Urugan*. Jakarta Selatan.
- Gideon, Vis. 1993. *Dasar-dasar Perencanaan Beton Bertulang*. Jakarta: Erlangga.
- Heyward, Wallace. 1982. *Grouting In Geotechnical Engineering*. New York: American Society of Civil Engineers.
- Ika Adya. (2014). *Laporan Survey Investigasi Tambahan Bendungan Tugu*. Trenggalek.
- Indra karya. (2013). *Laporan Akhir Perencanaan Pembangunan Bendungan Tugu*. Trenggalek.
- M. Das, Braja. (1983). *Advanced Soil Mechanics*. Washington, New York, London: Hemisphere Publishing Corporation.
- Sosrodarsono, Suyono dan Nakazawa, Kazuto. (2016). *Bendungan Type Urugan*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Sosrodarsono, Suyono dan Takeda, Kensaku. (1981). *Mekanika Tanah Dan Teknik Pondasi*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Wijaya Karya. (2016). *Usulan dan Tanggapan Perbaikan Pondasi dengan Dinding Halang pada Bendungan Tugu*. Trenggalek.