

# ANALISA KESTABILAN BENDUNGAN LOLAK 1

Rheky Julistian Lontoh,

Fabian J. Manoppo, Oktovian B. A. Sompie

Program Studi Teknik Sipil Pascasarjana Universitas Sam Ratulangi Manado

e-mail: [rhekyjulistian@gmail.com](mailto:rhekyjulistian@gmail.com)

## ABSTRACT

*In order to support the national water security program, which is the fulfillment of raw water for households, cities and industries, and also for the efforts to reduce water damage due to flood in Bolaang Mongondow Regency, especially in Lolak Sub district, its carried out by construction of the Lolak Dam.*

*In addition for many of the benefits that can be obtained by the construction of Lolak dam, there are also potential problems that can be caused by the impact of the dam construction that is a potential failure on the dam itself. The potential for dam failure in general can occur due to the influence of hydrology and hydraulics, due to the influence of water seepage and due to the influence of the structure.*

*Through this paper, the author has analyzed in terms of the calculation of potential dam failure caused by the influence of hydrology and hydraulics, water seepage, and failure due to structural influences, among others by analyzing the effectiveness of foundation repairs using the grouting method, analyzing the stability of the dam to deformation, safety factor, for various kinds of scenarios (8 scenarios), as well as analyzing the stability of the dam to seepage and critical velocity of the body and foundation of the dam for conditions before and after soil improvement.*

*The calculation and analysis of the stability of the dam is done using the PLAXIS 8.5 software. The parameters used in the PLAXIS analysis model are  $\gamma_{unsat}$  (gamma unsaturated),  $\gamma_{sat}$  (gamma saturated),  $E$  (modulus of elasticity),  $C$  (cohesion), Permeability ( $k$ ), Poisson Ratio ( $n$ ),  $\phi$  (shear angle) adjusted according to the dam design parameters planned, then juxtaposed with the required criteria and permitted safety factors.*

**Keywords:** Dam, Lolak Dam, Dam Stability, Soil Improvement.

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Bendungan Lolak merupakan salah satu bendungan dari total 65 bendungan yang ditargetkan untuk dibangun selang waktu 2015-2019 di Indonesia, adapun fungsi dari pembangunan bendungan-bendungan ini ditujukan pada peningkatan ketahanan air guna meningkatkan ketahanan pangan, upaya pengendalian banjir serta untuk menunjang di sektor pariwisata.

Selain dampak positif yang ditimbulkan sebagai dampak dibangunnya bendungan lolak ini, pembangunan bendungan juga mempunyai resiko tinggi berupa kemungkinan terjadinya kegagalan bendungan yaitu keruntuhan sebagian atau seluruh bendungan yang dapat mengancam keselamatan masyarakat pada kawasan hilir bendungan. Kegagalan pada bendungan dapat disebabkan oleh kegagalan struktur antara lain terjadi longsor, kegagalan hidraulik yang mengakibatkan terjadi peluapan air, kegagalan

operasi dan terjadinya rembesan yang dapat mengganggu kestabilan bendungan.

Untuk meminimalkan resiko akan kegagalan bendungan yang ditimbulkan akibat terjadinya longsor pada tubuh bendungan, daya dukung pondasi terhadap struktur bangunan, serta adanya peluang terjadinya rembesan yang dapat terjadi pada tubuh bendungan serta pada bagian pondasi, maka perlu adanya analisis terhadap kestabilan pada bendungan terhadap resiko tersebut.

Tulisan ini menjadi berbeda ketika tinjauan pembangunan bendungan menampilkan data-data perbaikan secara primer terhadap perbaikan pondasi yang telah dilakukan dan mengaplikasikan kedalam beberapa skenario sehingga dapat diuji apakah bendungan yang sedang dibangun aman atau tidak kedepannya.

Dalam kajian ini penulis menggunakan software PLAXIS untuk mensimulasi menyangkut pergerakan maupun pengaruh yang terjadi pada tubuh dan atau pada pondasi

bendungan pada waktu sedang dibangun, maupun setelah dibangun.

### Perumusan Masalah

Masalah yang akan dibahas dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Analisa terhadap resiko kegagalan Bendungan Lolak terhadap faktor keamanan yang diijinkan pada tubuh bendungan.
2. Analisa terhadap resiko kegagalan Bendungan Lolak terhadap rembesan yang terjadi di tubuh bendungan dan di pondasi bendungan.
3. Analisa terhadap pengaruh perbaikan tanah terhadap bangunan Bendungan terhadap bahaya erosi buluh pada pondasi.

### Pembatasan Masalah

Dalam tulisan ini, masalah dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

1. Tinjauan penelitian hanya dilakukan pada pondasi bangunan utama Bendungan Lolak di titik tinjauan yaitu di STA +15.
2. Analisis menggunakan metode *finith elemen* dengan menggunakan program PLAXIS 8.5.
3. Stabilitas tubuh bendungan yang dimaksud adalah masih amannya tubuh bendungan berdasarkan *safety factor* terhadap bangunan dan terhadap rembesan yang diijinkan terhadap bangunan bendungan.

### Tujuan Penelitian

Mengetahui Penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut :

1. Analisa stabilitas Bendungan Lolak terhadap faktor keamanan menggunakan *software* PLAXIS dalam beberapa skenario.
2. Analisa stabilitas bendungan lolak terhadap pengaruh rembesan pada tubuh maupun pondasi Bendungan Lolak dengan menggunakan *software* PLAXIS.
3. Efektifitas perbaikan tanah dengan menggunakan metode grouting pada perbaikan pada pondasi Bendungan Lolak.

### Manfaat Penelitian

Manfaat dari penulisan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mendapatkan angka keamanan (*safety factor*) terhadap stabilitas bendungan ditinjau angka keamanan yang diijinkan maupun ditinjau dari besarnya rembesan yang terjadi pada bendungan.

2. Dapat menghitung efektifitas grouting pada kegiatan perbaikan tanah terhadap bangunan sumber daya air.

## TINJAUAN PUSTAKA

### Definisi Bendungan

Waduk atau bendungan mempunyai bermacam-macam jenis dan berbagai manfaat. Beberapa macam jenis bendungan diantaranya adalah:

1. Tipe bendungan berdasarkan tujuannya:
  - a. Bendungan dengan tujuan tunggal (*single purpose dam*) adalah bendungan yang dibangun untuk memenuhi satu tujuan saja, misalnya untuk pembangkit tenaga listrik, irigasi, pengendali banjir, atau tujuan lainnya tetapi hanya untuk satu tujuan saja
  - b. Bendungan serbaguna (*multipurpose dam*) adalah bendungan yang dibangun untuk memenuhi beberapa tujuan, misalnya: pembangkit tenaga listrik (PLTA), pengendali banjir, air minum, air baku, irigasi dan lain sebagainya.
2. Tipe bendungan berdasarkan penggunaannya:
  - a. Bendungan penampung air (*storage dam*) adalah bendungan yang digunakan untuk menyimpan air pada masa surplus dan dipergunakan pada masa kekurangan, termasuk dalam bendungan penampung adalah tujuan rekreasi, perikanan, pengendali banjir dan lain-lain.
  - b. Bendungan pembelok (*diversion dam*) adalah bendungan yang digunakan untuk meninggikan muka air, biasanya untuk keperluan mengalirkan air ke dalam sistem aliran menuju ke tempat yang memerlukan.
  - c. Bendungan penahan (*detention dam*) adalah bendungan yang digunakan untuk memperlambat dan mengusahakan seminimal mungkin efek aliran banjir yang mendadak. Air ditampung secara berkala/sementara, dialirkan melalui pelepasan (outlet). Air ditahan selama mungkin dan dibiarkan meresap di daerah sekitarnya.
3. Tipe bendungan berdasarkan material pembentuknya :
  - a. Bendungan urugan (*rock fill dam, embankment dam*) adalah bendungan yang

dibangun dari hasil penggalian bahan (material) tanpa tambahan bahan lain yang bersifat campuran secara kimiawi, jadi betul-betul bahan pembentuk bangunan asli. Bendungan ini masih dibagi lagi menjadi dua yaitu bendungan urugan serba sama (*homogeneous dam*) adalah bendungan apabila bahan yang membentuk tubuh bendungan tersebut terdiri dari tanah yang hampir sejenis dan mempunyai gradasi (susunan ukuran butiran) hampir seragam. Kedua adalah bendungan zonal, adalah bendungan apabila timbunan yang membentuk tubuh bendungan terdiri dari batuan dengan gradasi (susunan ukuran butiran) yang berbeda-beda dalam urutan pelapisan tertentu.

- b. Bendungan beton (*concrete dam*) adalah bendungan yang dibuat dari konstruksi beton baik dengan tulangan maupun tidak. Kemiringan permukaan hulu dan hilir tidak sama pada umumnya bagian hilir lebih landai dan bagian hulu mendekati vertikal dan bentuknya ramping. Bendungan ini dibagi lagi menjadi dua yaitu bendungan beton berdasarkan berat sendiri stabilitas tergantung pada massanya, bendungan beton dengan penyangga (*buttress dam*) dimana permukaan hulu menerus dan di hilirnya pada jarak tertentu ditahan, bendungan berbentuk lengkung serta bendungan beton kominasi.

### **Keamanan Bendungan dari Potensi Kegagalan**

Bendungan memiliki kedalaman atau ketinggian. Tinggi bendungan merupakan beda tinggi secara vertikal antara puncak dan bagian terbawah dari pondasi bendungan. Tinggi bendungan harus ditentukan secara optimal yaitu dengan memperhatikan tinggi ruang bebas dan tinggi air untuk operasi waduk. Faktor-faktor yang perlu diperhatikan dalam menentukan tinggi ruang bebas antara lain :

1. Tinggi ruang bebas (*freeboard*) untuk bendungan urugan minimal 1 meter lebih tinggi dibanding bendungan beton karena air sama sekali tidak boleh melimpah melewati puncak bendungan.
2. Peninggian puncak bendungan urugan selama proses konstruksi tidak boleh dihitung sebagai bagian dari tinggi ruang bebas.

3. Jika di sebelah hilir bendungan terdapat daerah yang padat penduduknya atau bangunan vital, maka tinggi ruang bebas harus di ambil lebih besar. (Soedibyo, 1993).

Konstruksi tubuh bendungan tanah, secara umum harus menyediakan bangunan pelimpah dan atau bangunan pengeluaran yang cukup kapasitasnya untuk mencegah terjadinya limpasan yang melewati puncak bendungan, hanya diperbolehkan yang berasal dari gelombang yang terjadi karena angin, tanpa menimbulkan kerusakan tubuh bendungan yang berarti.

Lereng di hulu dan hilir bendungan harus tidak mudah longsor. Lereng di hulu bendungan harus stabil dan aman dalam semua kondisi, baik pada waktu waduk kosong, penuh air maupun permukaan air turun dengan tiba-tiba (*rapid drawdown*). Demikian pula untuk lereng di sebelah hilir harus stabil dan aman pada semua kondisi. Aman disini meliputi aman terhadap geser, aman terhadap penurunan bendungan dan aman terhadap rembesan. (Soedibyo, 1993).

Kegagalan bendungan tanah dapat dikelompokkan dalam 3 kategori umum. Kategori tersebut adalah kegagalan *overtopping*, kegagalan rembesan, dan kegagalan struktur. (*North Carolina Department of Environment and Natural Resources, 2007*).

Desain tubuh bendungan tanah dapat diperhitungkan dari beragam potensi kegagalan yang mungkin dapat terjadi. Kerusakan pada tubuh bendungan tanah dapat diklasifikasikan menjadi 3 tipe, yaitu

1. Tipe kegagalan akibat pengaruh Hidrologi dan Hidrolika
2. Tipe kegagalan akibat pengaruh perembesan Air.
3. Tipe kegagalan karena Pengaruh Struktur.

### **Penurunan (*Settlement*)**

Ketika suatu lapisan tanah diberikan beban di atasnya (misalnya pondasi atau timbunan tanah di atasnya) maka partikel tanah akan mengalami penambahan tegangan, sehingga pada tanah terjadi penurunan (*settlement*). Keluarnya air dari dalam pori selalu disertai dengan berkurangnya volume tanah. Berkurangnya volume tanah ini menyebabkan penurunan lapisan tanah tersebut. Secara umum jenis penurunan yang terjadi akibat pembebanan dapat dibagi dalam 3 tahap, yaitu: 1. Penurunan seketika (*immediate settlement*). 2. Penurunan konsolidasi primer (*primary consolidation*

settlement). 3. Penurunan konsolidasi sekunder (*secondary consolidation settlement*).

Penurunan total dari tanah berbutir halus yang jenuh ialah jumlah dari penurunan segera, penurunan konsolidasi primer, dan penurunan konsolidasi sekunder. Bila dinyatakan dalam bentuk persamaan, penurunan total adalah (Hardiyanto, 2002):

$$St = Si + Sc + Ss \quad \dots (1)$$

dimana:  $St$  = penurunan total,

$Si$  = penurunan segera,

$Sc$  = penurunan akibat konsolidasi primer,

$Ss$  = penurunan akibat konsolidasi sekunder.

Besarnya penurunan bendungan bendungan ( $\Delta H$ ) yang disebabkan oleh adanya proses konsolidasi dihitung dengan rumus:

$$(\Delta H) = mv \times \Delta \sigma v \times H \quad \dots (2)$$

Dimana :

$\Delta H$  = Besarnya penurunan tubuh bendungan (m)

$H$  = Tinggi bendungan (m)

$mv$  = Koefisien kompresibilitas ( $\text{cm}^2/\text{kg}$ )

$\Delta \sigma v$  = Selisih pertambahan tegangan vertikal awal dan akhir ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

Waktu penurunan bendungan ( $t$ ) yang disebabkan oleh adanya proses konsolidasi dihitung dengan rumus :

$$t = \frac{T \times H^2}{c_v} \quad (3)$$

Dimana :

$t$  = Waktu penurunan (tahun)

$H$  = Tinggi bendungan (m)

$T$  = *Time factor*

$c_v$  = Koefisien konsolidasi ( $\text{cm}^2/\text{det}$ )

### Stabilitas Bendungan

Untuk tanah yang kohesif, gerusan terjadi dengan mekanismen memotong puncak bendungan. Potongan secara tipikal mulai dari dekat kaki bendungan dan menuju puncak bendungan. Ralston menjelaskan bahwa keruntuhan dari tanah non kohesif dapat dimodelkan dengan analisis *tractive stress*, namun hanya jika tubuh bendungan tidak diberi inti kohesif. Seepage yang melalui tubuh bendungan dapat meningkatkan tingkat erosi . Jika tubuh bendungan mempunyai inti kohesif yang simetris dengan aksis bendungan, maka inti tersebut dapat tererosi.

Stabilitas lereng hulu dan lereng hilir bendungan tanah harus dianalisis pada kondisi pembebanan kritis yang mungkin dialami oleh bendungan tanah pada masa layanannya. Secara tipikal kondisi pembebanan adalah sebagai berikut:

- Setelah masa konstruksi – ketika tegangan pori terjadi peningkatan secara signifikan pada tubuh bendungan maupun pondasi selama proses kontruksi bendungan.
- Rembesan Aliran Tunak (*Steady-State Seepage*) – Ketika setelah masa yang lama ditemui rembesan/mata air pada sisi hilir. Rembesan ini dapat terjadi ketika muka air normal, muka air banjir maupun ketika waktu pengisian air.
- Turun Tiba-tiba (*Rapid Drawdown*) – Ketika muka air turun lebih cepat daripada tegangan pori sehingga dapat mengeluarkan air dalam tubuh bendungan setelah terjadi kondisi rembesan aliran. Kondisi ini mengurangi *safety factor*, sehingga perlu dianalisis terutama pada lereng sisi hulu. Rapid drawdown dapat terjadi pada muka air normal maupun pada muka air banjir.
- Gempa bumi – ketika bendungan mengalami beban seismik. (*Natural Resources dan Mines Quessland Government, 2002*).

Menurut Dr. Suyono Sosrodarsono – 1977, untuk perhitungan stabilitas tubuh bendungan biasanya dilakukan dengan metode irisan bidang luncur bundar (*slice method on circular slip surface*). Akan tetapi jika garis lingkaran suatu bidang luncur berpapasan dengan bagian-bagian yang paling lemah, baik pada tubuh bendungan, maupun pada pondasinya, maka supaya digunakan bidang luncur kombinasi. Apabila lereng udik maupun lereng hilir suatu bendungan urugan ditutup oleh lapisan bahan-bahan yang tidak bersifat kohesif (batu, kerikil atau pasir), maka supaya dilakukan perhitungan dengan bidang luncur bundar berradius besar. Selanjutnya akan diuraikan perhitungan metode irisan pada bidang luncur bundar dan metode irisan pada bidang luncur kombinasi. Untuk metode irisan bidang luncur bundar;

Andaikan bidang luncur bundar dibagi dalam beberapa irisan vertikal, maka factor keamanan dari kemungkinan terjadinya longoran dapat diperoleh dengan menggunakan rumus keseimbangan sbb:

$$Fs = \frac{\Sigma\{C.I + (N - U - Ne) \tan \Phi\}}{\Sigma (T + Te)}$$

$$= \frac{\Sigma C.I + \Sigma\{\gamma.A(\text{Cos}\alpha - e.\sin\alpha) - V\} \tan \Phi}{\Sigma \gamma.A (\sin\alpha + e.\text{Cos}\alpha)}$$

dimana :

$Fs$  : faktor keamanan

- N : Beban komponen vertikal yang timbul dari berat setiap irisan bidang lurus ( $= \gamma \cdot A \cdot \cos \alpha$ )
- T : Beban komponen tangensial yang timbul dari berat setiap irisan bidang lurus ( $= \gamma \cdot A \cdot \sin \alpha$ )
- U : Tekanan air pori yang bekerja pada setiap irisan bidang lurus
- Ne : Komponen vetikal beban seismis yang bekerja pada setiap irisan bidang lurus
- Te : Komponen tangensial beban seismis yang bekerja pada setiap irisan bidang lurcunya ( $= e \cdot \gamma \cdot A \cdot \cos \alpha$ )
- $\Phi$  : Sudut gesekan dalam bahan yang membentuk dasar setiap irisan bidang lurus.
- C : Angka kohesi bahan yang membentuk dasar setiap irisan bidang lurus.
- Z : Lebar setiap irisan bidang lurus
- e : Intensitas seismis horizontal
- $\gamma$  : Berat isi dari setiap bahan pembentuk irisan bidang lurus
- A : Luas dari setiap bahan pembentuk irisan bidang lurus
- $\alpha$  : Sudut kemiringan rata-rata dasar setiap irisan bidang lurus
- V : Tekanan air pori

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0}$$

atau

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

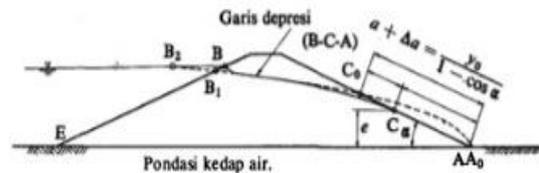
Atau

$$y_0 = \sqrt{h^2 + hd^2} - d$$

dimana :

- h : jarak vertical antara titik-titik A dan B
- d : jarak horizontal antara titik B<sub>2</sub> dan A
- l<sub>1</sub> : jarak horizontal antara titik B dan E
- l<sub>2</sub> : jarak horizontal antara titik B dan A
- A : ujung tumit hilir bendungan
- B : titik perpotongan antara permukaan air waduk dan lereng udik bendungan
- A<sub>1</sub> : titik perpotongan antara parabola bentuk besar garis depresi dengan garis vertikal melalui titik B
- B<sub>2</sub> : titik yang terletak sejauh 0,3 l<sub>1</sub>, horizontal ke arah udik dari titik B.

Akan tetapi garis parabola bentuk besar (B<sub>2</sub> – C<sub>0</sub> – A<sub>0</sub>) diperoleh dari persamaan tersebut, bukanlah garis depresi yang sesungguhnya, masih diperlukan penyesuaian-penyesuaian menjadi garis B – C – A yang merupakan bentuk garis depresi yang sesungguhnya seperti yang tertera pada Gbr. 2., sebagai berikut:



Gambar 2. Garis depresi pada bendungan homogen (sesuai dengan garis parabola yang mengalami modifikasi)

- Pada titik permulaan, garis depresi berpotongan tegak lurus dengan lereng udik bendungan, dan dengan demikian titik C<sub>0</sub> dipindahkan ke titik C sepanjang  $\Delta a$ .
- Panjang garis  $\Delta a$  tergantung dari kemiringan lereng hilir bendungan, dimana air filtrasi tersembul keluar yang dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

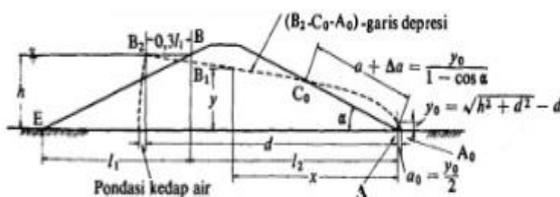
$$a + \Delta a = \frac{y_0}{1 - \cos \alpha}$$

dimana :

- a : jarak AC
- $\Delta a$  : jarak C<sub>0</sub> C
- $\alpha$  : Sudut kemiringan lereng hilir bendungan

### Formasi garis depresi

Formasi garis depresi pada zona kedap air suatu bendungan dapat diperoleh dengan metode Casagrande. Apabila angka permeabilitas vertikalnya ( $k_v$ ) berbeda dengan angka permeabilitas horizontalnya ( $k_h$ ), maka akan terjadi deformasi garis depresi dengan mengurangi koordinat horizontalnya sebesar  $\sqrt{k_v/k_h}$  kali. Pada gambar 2., ujung tumit hilir bendungan dianggap sebagai titik permulaan koordinat dengan sumbu-sumbu x dan y, maka garis depresi dapat diperoleh dengan persamaan parabola bentuk dasar sebagai berikut:



Gambar 1. Garis depresi pada bendungan homogen (sesuai dengan garis parabola)

Apabila kemiringan sudut lereng hilir bendungan lebih kecil dari 30°, maka harga a dapat diperoleh dengan rumus sbb:

$$a = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\left(\frac{d}{\cos \alpha}\right)^2 - \left(\frac{h}{\sin \alpha}\right)^2}$$

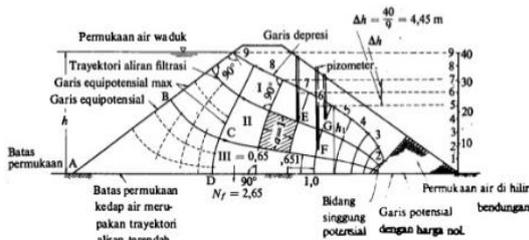
**Pembuatan jaringan trayektori aliran filtrasi (seepage flow-net)**

Berbagai metode telah dikembangkan untuk membuat jaringan trayektori aliran filtrasi pada bendungan urugan dan metode yang paling sesuai dan sederhana adalah metode grafis yang diperkenalkan oleh Forchheimer (*Forchheimer's diagrammatical solution*).

Akan tetapi metode ini mempunyai kelemahan yang cukup menonjol, dimana penggunaannya akan mencapai hasil yang baik, hanya oleh tenaga ahli yang cukup berpengalaman.

Didasarkan pada jaringan trayektori aliran filtrasi yang telah tergambar, selanjutnya dapat dihitung kapasitas air filtrasi yang telah tergambar, selanjutnya dapat dihitung kapasitas air filtrasi dengan ketelitian yang cukup baik dan gambar tersebut akan sangat cocok dengan kenyataan apabila dibuat oleh tenaga ahli yang cukup berpengalaman.

Contoh jaringan trayektori aliran filtrasi dapat diperhatikan pada Gbr. 3.



Gambar 3. Jaringan trayektori aliran filtrasi dalam tubuh bendungan (Dengan jumlah potensial = 9)

Untuk menggambar jaringan trayektori aliran filtrasi melalui sebuah bendungan supaya diperhatikan hal-hal sbb.:

- Trayektori aliran filtrasi dengan garis equi-potensial berpotongan secara tegak lurus, sehingga akan membentuk bidang-bidang yang mendekati bentuk-bentuk bujur-sangkar atau persegi panjang
- Jadi apabila diperhatikan bentuk bidang ABCD (Gbr.4) hanya mendekati bentuk bujur sangkar, akan tetapi apabila dibagi-bagi lagi menjadi bagian yang lebih kecil, maka bujur sangkarnya akan semakin nyata.

- Biasanya bidang-bidang yang terbentuk oleh pertolongan trayektori aliran filtrasi dengan garis-garis equi-potensial tersebut di atas lebih mendekati bentuk-bentuk persegi panjang dan pada semua persegi panjang yang terjadi, perbandingan antara sisi pendek dan sisi panjangnya mendekati harga yang sama.
- Pada bidang di bawah tekanan atmosfer, dimana aliran filtrasi tersembul keluar, bukan merupakan trayektori aliran filtrasi dan bukan pula merupakan garis equi-potensial, karenanya tidak akan terbentuk bidang-bidang berbentuk persegi-panjang dan trayektori aliran filtrasi dengan permukaan tersebut tidak akan berpotongan secara vertical.
- Garis depresi yang berpotongan dengan bidang di bawah tekanan atmosfer (titik tertinggi tersembulnya aliran filtrasi).
- Titik perpotongan antara garis-garis equi-potensial dengan garis depresi adalah dengan interval ( $\Delta h$ ) yang diperoleh dengan membagi tinggi tekanan air (perbedaan antara elevasi permukaan air dalam waduk dan permukaan air di bagian hilir bendungan) dengan suatu bilangan integer (bilangan bulat).

Dengan demikian, dalam satu bidang terdiri dari lima trayektori aliran filtrasi dan satu garis equi-potensial. Dan pembiasan sudut dari garis trayektori aliran filtrasi dapat dihitung dengan persamaan sbb.:

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{k_f}{k_e} \tan \theta_1 \right)$$

dimana:

$k_f$ : koefisien filtrasi pondasi

$k_e$ : koefisien filtrasi tubuh bendungan

Bentuk jaringan filtrasi pada saat terjadinya penurunan mendadak (rapid draw down) permukaan air waduk. Aliran filtrasi pada saat terjadinya penurunan mendadak permukaan air waduk, merupakan aliran tak tetap (*unsteady flow*), karenanya analisisnya pun seharusnya didasarkan pada teori aliran tak tetap, akan tetapi teori tersebut sangat kompleks. Untuk lebih menyederhanakan penganalisisannya, biasanya digunakan rumus-rumus Laplace dengan anggapan bahwa penurunan permukaan air waduk terjadi demikian cepatnya, sehingga kapasitas dari fasilitas-fasilitas pelimpah pada bendungan dapat diabaikan.

Dalam analisa ini gejala penyusutan dan gaya-gaya kapiler yang terjadi pada tubuh bendungan diabaikan, sehingga hasil analisa

akan menjadi lebih aman. Dan jaringan trayektori aliran filtrasi yang diperoleh akan merupakan gambaran dalam kondisi yang bersifat sementara. Lereng udik dapat dianggap sebagai garis equi-potensial dan karenanya trayektori pada bidang lereng atas dapat digambarkan sebagaimana biasa (dalam kondisi aliran tetap), sedangkan trayektori aliran filtrasi di dalam tubuh bendungan akan tergantung dari kecepatan penurunan permukaan air waduk, permeabilitas bahan pembentuk tubuh bendungan dan kondisi permukaan lereng udik bendungan.

Permeabilitas bahan-bahan pembentuk tubuh bendungan, merupakan faktor yang paling menentukan untuk karakteristik gambar jaringan aliran filtrasi dan umumnya akan memberikan hasil sbb. :

- Untuk bahan tubuh bendungan, dengan  $k > 1 \times 10^{-3}$  cm/dt, maka penurunan permukaan air dalam waduk akan bersamaan dengan penurunan air yang terdapat dalam tubuh bendungan.
- Untuk bahan tubuh bendungan dengan  $1 \times 10^{-3}$  ( $k < 1 \times 10^{-3}$  cm/dt), maka penurunan permukaan air dalam waduk akan segera diikuti oleh penurunan permukaan air yang terdapat di dalam tubuh bendungan.
- Untuk bahan tubuh bendungan dengan  $k < 1 \times 10^{-3}$  cm/dt, maka penurunan permukaan air dalam waduk tidak lagi segera diikuti oleh penurunan permukaan air dalam tubuh bendungan.

**Kapasitas aliran filtrasi**

Berbagai metode telah dikembangkan untuk membuat jaringan trayektori aliran filtrasi pada bendungan urugan dan metode yang paling sesuai dan sederhana adalah metode grafis yang diperkenalkan oleh Forchheimer (*Forchheimer's diagrammatical solution*).

Kapasitas aliran filtrasi adalah kapasitas rembesan air yang mengalir ke hilir melalui tubuh dan pondasi bendungan. Kapasitas filtrasi suatu bendungan mempunyai batas-batas tertentu yang mana apabila kapasitas filtrasi melampaui batas tersebut, maka kehilangan air yang terjadi akan cukup besar, disamping itu kapasitas filtrasi yang besar dapat menimbulkan gejala sufosi (*piping*) serta gejala sembulan (*boiling*) yang sangat membahayakan kestabilan tubuh bendungan.

Untuk memperkirakan besarnya kapasitas filtrasi suatu bendungan (baik yang melalui tubuh bendungan maupun yang melalui lapisan

pondasi) dapat dilakukan dengan menggunakan rumus-rumus empiris. Apabila bahan pembentuk tubuh dan pondasi bendungan mempunyai harga  $k_v$  dan  $k_h$  yang berbeda, maka untuk menghitung kapasitas aliran filtrasi dilakukan dengan harga  $k$  yang telah dimodifisir ( $\check{k}$ ). Harga dapat dihitung dengan menggunakan rumus sbb.:

$$\check{k} = \sqrt{k_v/k_h}$$

dimana:

- $\check{k}$  : koefisien filtrasi yang dimodifisir
- $k_v$  : koefisien filtrasi vertikal
- $k_h$  : koefisien filtrasi horizontal

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

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

dimana:

- $Q_f$  : kapasitas aliran filtrasi (kapasitas rembesan)
- $N_f$  : angka pembagi dari garis trayektori aliran filtrasi
- $N_p$  : angka pembagi dari garis equi-potensial
- $K$  : koefisien filtrasi
- $H$  : tinggi tekanan air total
- $L$  : Panjang profil melintang tubuh bendungan

Memperkirakan kapasitas filtrasi dengan rumus empiris sbb.:

$$Q_f = \Sigma q . B$$

dan

$$q = k . i . A$$

dimana:

- $Q_f$  : kapasitas filtrasi
- $q$  : kapasitas filtrasi per unit panjang tubuh bendungan
- $B$  : lebar profile tubuh bendungan
- $k$  : koefisien filtrasi
- $i$  : gradient hydrolis
- $A$  : luas potongan lintang yang dilalui air filtrasi per unit lebar

Untuk memperkirakan kapasitas filtrasi pada pondasi bendungan, kapasitas filtrasi yang didasarkan pada jaringan aliran filtrasi dapat dihitung dengan mempergunakan skema jaringan aliran filtrasi dapat dihitung dengan mempergunakan skema jaringan trayektori aliran filtrasi yang tertera pada Gbr. 2. akan tetapi apabila bendungan dilengkapi dengan alas kedap

air (blanket), maka kapasitas filtrasi dapat dihitung dengan rumus empiris sebagai berikut :

$$q = \frac{k \cdot H}{\pi} \cdot \sin^{-1} \left( \frac{y}{c} \right) \frac{k \cdot H}{\pi} \log_e \left( \frac{y}{c} + \sqrt{\frac{y^2 + c^2}{c}} \right)$$

dimana:

- q : kapasitas filtrasi per unit panjang bendungan
- k : koefisien filtrasi
- H : tinggi tekanan air total
- y : kedalaman dari suatu titik, pada pondasi
- e : setengah lebar dari zona kedap air

Hal yang perlu dilakukan untuk mengetahui stabilitas lereng bendungan tanah adalah dengan menghitung tegangan geser yang terbentuk sepanjang permukaan retak yang paling mungkin. Proses ini dinamakan analisis stabilitas lereng (*slope stability analysis*).

Metode untuk menghitung stabilitas lereng telah banyak diperkenalkan oleh para ahli, yaitu dengan metode keseimbangan batas (*Limit Equilibrium*), antara lain *Method of Slice* (Fellenius, 1927, 1936), *Bishop's Simplified Method* (Bishop, 1955), *Janbu's Simplified Method* (Janbu, 1954, 1957, 1973), *Morgenstern-price Method* (Morgenstern dan Price, 1965), dan beberapa metode lainnya. Selain analisis menggunakan metode keseimbangan batas, analisis dapat dilakukan menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) yang berdasarkan analisis matrik.

Perhitungan analisis stabilitas lereng menuntut ketelitian dan ketekunan. Bahkan untuk variabel seperti lapisan tanah dan parameter kekuatan geser tanah merupakan pekerjaan yang membosankan karena harus melakukan iterasi yang berulang-ulang. Untuk itu dibuatlah suatu program komputer untuk mempermudah perhitungan yang sulit dilakukan dengan cara manual.

Pada penelitian ini, perhitungan stabilitas lereng dibatasi dengan menggunakan metode *Finite Element* lewat alat bantu program PLAXIS. PLAXIS adalah perkembangan dari *software* elemen hingga sebelumnya dan sudah tersedia fasilitas *auto mesh* yang secara otomatis membuat diskritisasi model, sehingga mudah untuk digunakan dalam membuat modeling tanah.

### Pengujian Permeabilitas

Menurut Dr. Suyono Sosrodarsono, tingkat permeabilitas suatu bahan biasanya ditandai

dengan angka koefisien permeabilitas atau koefisien filtrasi dengan satuan cm/dt. Untuk memperoleh koefisien filtrasi biasanya bahan diuji dalam laboratorium yang didasarkan pada teori yang sederhana. Teori ini didasarkan pada hubungan antara kecepatan aliran air melalui pori-pori tanah dan gradien hidrolis, dimana aliran air melalui pori-pori tersebut dianggap bersifat laminar. Berdasarkan pada fenomena tersebut, maka oleh *Darcy* diciptakan sebuah rumus yang disebut rumus Darcy, sebagai berikut:

$$Q = Ki A$$

Dimana:

- Q : debit yang mengalir melalui satuan penampang per satuan waktu (cm<sup>3</sup>/dt)
- I : gradient hidrolis
- K : koefisien filtrasi (cm/dt), yang menunjukkan tingkat permeabilitas suatu bahan tanah
- A : penampang lintang (cm<sup>2</sup>)

Berdasarkan besarnya angka koefisien filtrasi, maka tingkat permeabilitas bahan tanah dibedakan dalam tiga kelompok, sebagai berikut:

- Lulus air (*permeable*) =  $K > 1 \times 10^{-4}$  (cm/dt)
- Semi lulus air (*semi-permeable*) =  $K \approx 1 \times 10^{-4}$
- Kedap air (*impermeable*) =  $K < 1 \times 10^{-4}$

Mengingat bahan untuk zone kedap air suatu bendungan, membutuhkan tanah dengan kekuatan geser yang tinggi, tetapi dengan permeabilitas yang rendah serta daya dukung yang cukup, maka perlu dipertimbangkan kemungkinan pencampuran bahan yang berbutir kasar dengan bahan yang berbutir halus dalam komposisi yang serasi, sehingga dihasilkan suatu bahan campuran dengan kekuatan geser cukup tinggi, tetapi masih mempunyai angka koefisien filtrasi yang diizinkan.

Selanjutnya pengaruh butiran kerikil terhadap permeabilitas tanah adalah sebagai berikut :

- Apabila campuran butiran kerikil ( $\emptyset > 4,8$  mm) dalam komposisi lebih kecil dari 40% maka kepadatan dari butiran yang lebih kecil dari 40%, maka kepadatan dari butiran yang lebih halus ( $\emptyset > 4,8$  mm) akan meningkat dan dengan demikian permeabilitasnya menjadi lebih rendah.
- Akan tetapi apabila campuran butiran kerikil (dengan  $\emptyset > 4,8$  mm) dalam komposisi lebih besar dari 40%, maka kepadatan daripada

butiran yang lebih halus akan menurun dan dengan demikian permeabilitas bahan akan meningkat.

Mengingat kondisi permeabilitas suatu bahan tanah akan sangat berbeda-beda yang disebabkan hal-hal seperti : besarnya komponen butiran kerikil, bentuk dari butiran-butirannya, plastisitas dari komponen berbutir halus, berat isi dari komponen berbutir halus, dan sebagainya, maka permeabilitas setiap bahan supaya selalu diselidiki dengan pengujian yang berkali-kali.

Dalam keadaan dimana tanah berbutir kasar harus dipergunakan sebagai bahan yang kedap air, maka harus diketahui hubungan antara prosentasi komponen kerikil dan koefisien filtrasinya dengan menggunakan alat pengujian dalam skala yang lebih besar, agar koefisien filtrasi yang diperoleh identik dengan koefisien filtrasi seluruh komponen bahan.

Semakin kecil koefisien filtrasi suatu bahan, maka semakin panjang waktu yang diperlukan untuk mengeluarkan air pori dari bahan tersebut dan penurunan bahan menjadi lebih lambat. Demikianlah, suatu gejala dimana terjadinya proses penurunan kadar air yang berangsur-angsur dengan pembebanan yang konstan pada tanah dengan akibat tanah termampatkan disebut konsolidasi (*consolidation*).

## METODOLOGI PENELITIAN

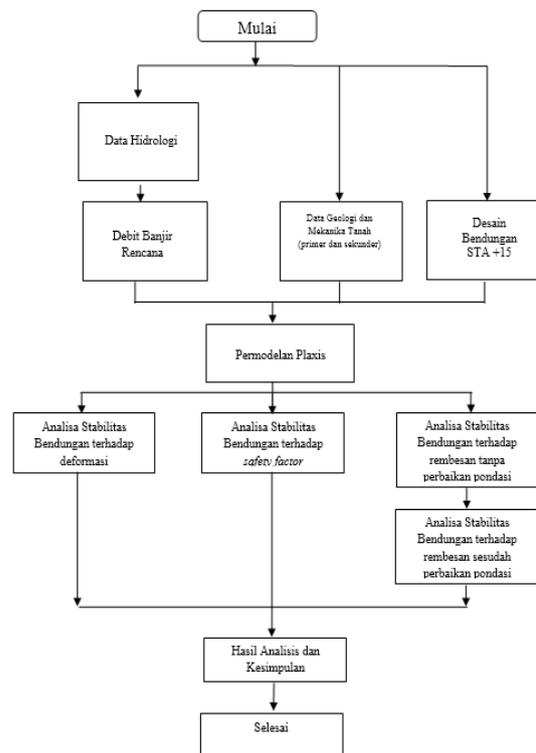
### Gambaran Umum Lokasi Penelitian

Lokasi kegiatan pembangunan bendungan lolak terletak di Desa Pindol Kecamatan Lolak Kabupaten Bolaang Mongondow Provinsi Sulawesi Utara. Secara geografis lokasi bendungan terletak pada posisi 000o48'9,31" Lintang Utara dan 124o4'19,21" Bujur Timur.

### Analisis Data

Data primer maupun sekunder yang diperoleh dilakukan analisis menggunakan aplikasi PLAXIS. Setelah dilakukan running melalui program PLAXIS disandingkan dengan hasil perhitungan manual yang telah ada. Perbandingan dari hasil perhitungan manual yang ada dan program tersebut dibuat kesimpulan sebagai alternatif menyangkut kestabilan serta metode perbaikan yang ditawarkan dalam pembangunan Bendungan Lolak.

## Bagan Alir Penelitian

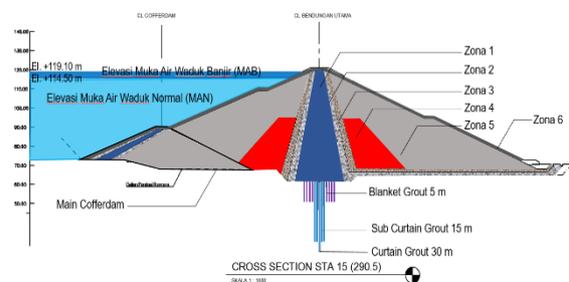


Gambar 4. Bagan Alir

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Parameter Desain Tubuh Bendungan

Pekerjaan penimbunan pada tubuh bendungan ini terdiri dari 6 (enam) macam zona penimbunan yaitu, zona 1 yang merupakan zona inti, zona 2 dan zona 3 merupakan zona filtrasi, zona 4 semi permeable, zona 5 merupakan timbunan batu, dan zona 6 merupakan batuan rip-rap (diameter > 1,00 m). Pada gambar dibawah ini merupakan susunan material penyusun tubuh bendungan.



Gambar 5. Susunan Material Tubuh Bendungan

Pada tabel dibawah ini menunjukkan susunan parameter material bendungan yang akan digunakan pada pemodelan bendungan.

Tabel 1. Data Parameter Material Penyusun Tubuh Bendungan

Uraian	Zona	k	D <sub>set</sub>	D <sub>wet</sub>	D <sub>dry</sub>	C	φ	E	ν (nu)
		cm/det	ton/m <sup>3</sup>	ton/m <sup>3</sup>	ton/m <sup>3</sup>	ton/m <sup>2</sup>	(°)	kN/m <sup>2</sup>	
Rup-Rap	6	Free Drain	2.28	2.21	1.96	-	40.00	150,000.00	0.30
Random Batu	5	3.50E-01	2.29	2.18	1.85	5.00	39.00	100,000.00	0.30
Random Galian Pondasi	4	7.16E-04	1.87	1.69	1.41	3.40	27.00	20,000.00	0.30
Filter Kasar	3	1.00E-02	2.17	2.14	1.63	4.00	35.00	100,000.00	0.30
Filter Halus	2	2.85E-03	1.99	1.74	1.51	4.00	30.00	100,000.00	0.30
Inti	1	2.25E-07	1.87	1.79	1.39	3.01	18.30	20,000.00	0.30

Sedangkan untuk parameter pondasi batuan diambil berdasarkan data hasil investigasi bendungan, yang merupakan data stratifikasi parameter yang mempunyai kelas batuan paling rendah dibandingkan dengan data bor lainnya. Kondisi batuan pada pondasi Bendungan Lolak ini terdiri dari 2 jenis batuan yaitu :

1. Satuan batu gunung api yang terdiri dari breksi, batu pasir tuffaan, dan lava basal.
2. Satuan batuan sedimen yang terdiri dari batu pasir dan serpih.

Untuk parameter pondasi batuan adalah seperti pada tabel di bawah ini:

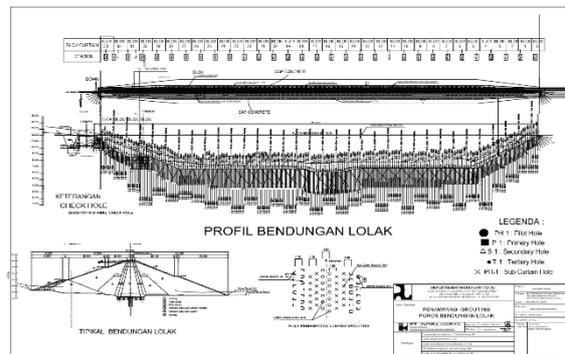
Tabel 2. Data Parameter Pondasi Bendungan Berdasarkan Data Log Bor Investigasi

Layer	Kedalaman (m)	N	E (kN/m <sup>2</sup> )	φ (°)	CU (kN/m <sup>2</sup> )	ν (nu)	D <sub>dry</sub> (ton/m <sup>3</sup> )	D <sub>wet</sub> (ton/m <sup>3</sup> )	K (cm/sec)
1	0 - 5	40	30,400.00	44.00	250.00	0.30	1.80	1.98	1.27E-03
2	5 - 10	40	30,400.00	44.00	250.00	0.30	1.80	1.98	1.27E-03
3	10 - 15	60	45,600.00	49.00	350.00	0.30	1.80	1.98	1.25E-03
4	15 - 20	45	34,200.00	45.00	250.00	0.30	1.80	1.98	1.25E-03
5	20 - 25	60	45,600.00	49.00	350.00	0.30	1.80	1.98	1.25E-03
6	25 - 30	60	45,600.00	49.00	350.00	0.30	1.80	1.98	1.25E-03

**Data Grouting pada Pondasi Bendungan Lolak**

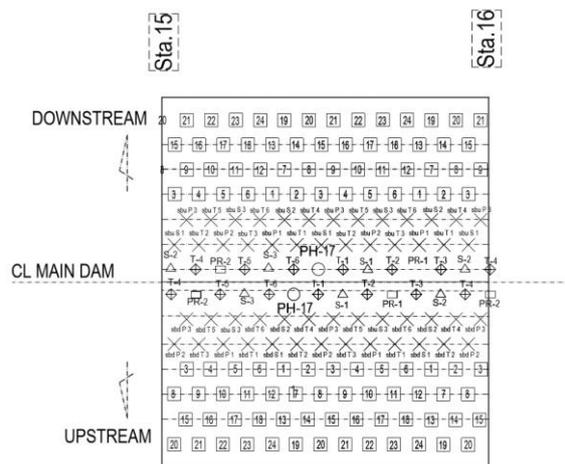
Pondasi Bendungan Lolak pada bagian riverbed merupakan bagian pondasi yang menerima beban terbesar dari seluruh gaya vertikal maupun gaya horizontal yang berkerja, dan lokasi tersebut terletak pada sta 15 – sta 16 main dam. Bagian riverbed ini memiliki volume yang paling besar, maka dari itu akan dilakukan analisa stabilitas bendungan, rembesan yang difokuskan pada bagian riverbed bendungan, analisa perhitungan tersebut dengan menggunakan bantuan software Plaxis Versi 8.6. Pada analisa rembesan yang melewati tubuh bendungan akan dilakukan pada sta 15 main dam, dan pada stasion tersebut sudah dilaksanakan proses grouting tirai sepanjang as bendungan bagian hulu dan hilir. Grouting tirai (curtain grouting) berfungsi sebagai penghalang laju rembesan air yang melewati bagian pondasi bendungan yang cenderung membesar atau bocor setelah dilaksanakan

pengisian muka air waduk. Untuk potongan memanjang bendungan beserta lokasi titik-titik grouting dapat dilihat pada gambar dibawah ini;

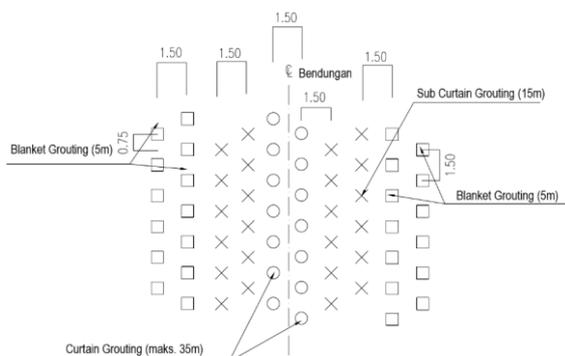


Gambar 6. Potongan Memanjang Bendungan Beserta Lokasi Titik-Titik Grouting

Untuk denah lubang grouting pada Sta 15 – Sta 16 Main Dam dapat dilihat pada gambar di bawah ini;



Gambar 7. Denah Lubang Grouting pada Sta 15 – Sta 16 Main Dam



Nilai hasil grouting dari tahap pilot hole sampai dengan ke tahap cek hole beserta konversi nilai Lugeon kepada nilai permeabilitas pondasi, dapat dilihat berikut ini:

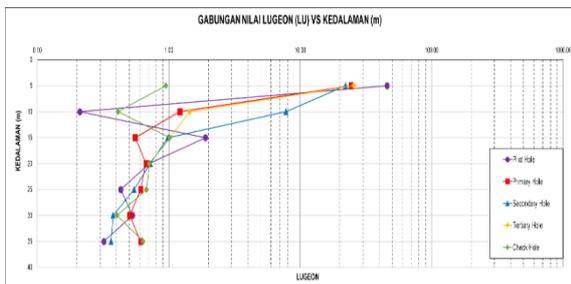
Tabel 3. Hasil Grouting pada Sta 15 Bagian U/S

Location	Stage	Depth m	PILOT HOLE	PRIMARY HOLE	SECONDARY HOLE	TERTIARY HOLE	CHECK HOLE	EFFECT GROUTING %	REMARK
			Upstream Line Lu (Lugeon)						
MAIN DAM STA 15 BLOK 17	1	0 - 5 m	45.71	24.47	22.08	25.42	0.95	97.92	VERY GOOD
	2	5 - 10 m	0.21	1.21	7.80	1.44	0.41	95.24	VERY GOOD
	3	10 - 15 m	1.90	0.56	0.98	1.02	1.02	46.49	
	4	15 - 20 m	0.71	0.67	0.72	0.71	0.71	0.23	
	5	20 - 25 m	0.43	0.61	0.54	0.68	0.68	56.98	
	6	25 - 30 m	0.53	0.51	0.38	0.40	0.40	23.90	
	7	30 - 35 m	0.32	0.61	0.36	0.64	0.64	98.96	
AVERAGE			7.12	4.89	4.79	4.33	0.89		

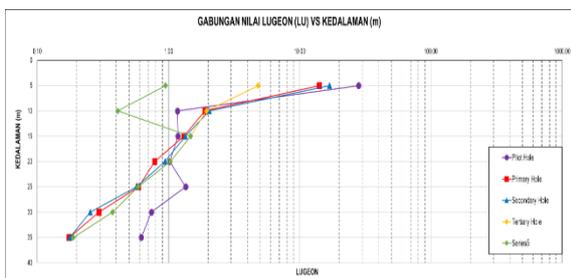
Tabel 4. Hasil Grouting pada Sta 15 Bagian D/S

Location	Stage	Depth m	PILOT HOLE	PRIMARY HOLE	SECONDARY HOLE	TERTIARY HOLE	CHECK HOLE	EFFECT GROUTING %	REMARK
			Downstream Lu (Lugeon)						
MAIN DAM STA 15 BLOK 17	1	0 - 5 m	28.14	14.13	16.90	4.83	0.95	96.62	VERY GOOD
	2	5 - 10 m	1.17	1.90	2.05	1.95	0.41	64.96	GOOD
	3	10 - 15 m	1.18	1.31	1.34	1.48	1.48	-25.00	
	4	15 - 20 m	1.02	0.79	0.94	1.03	1.03	-1.31	
	5	20 - 25 m	1.35	0.59	0.57	0.59	0.59	56.54	
	6	25 - 30 m	0.74	0.30	0.25	0.38	0.38	49.32	
	7	30 - 35 m	0.62	0.18	0.18	0.19	0.19	69.62	
AVERAGE			4.89	2.74	3.18	1.49	0.72		

Untuk mengetahui lebih jelas pengaruh pekerjaan grouting pada pondasi bendungan, maka nilai Lugeon tes yang sudah didapat disajikan dalam bentuk grafik pada gambar dibawah ini :



Gambar 9. Grafik Gabungan Nilai Lugeon Vs Kedalaman Lubang Grouting Sta -15 Bagian U/S



Gambar 10. Grafik Gabungan Nilai Lugeon Vs Kedalaman Lubang Grouting Sta -15 Bagian D/S

Dari tabel dibawah ini dapat disimpulkan bahwa nilai Lugeon dari tahap Pilot Hole sampai ke tahap Check Hole semakin menurun pada sta 15 baik pada bagian hulu maupun bagian hilir. Semakin kecil nilai Lugeon yang didapat maka semakin kecil pula nilai permeabilitasnya, jika nilai permeabilitas kecil maka rembesan yang

melewati pondasi bendunganpun akan semakin kecil. Untuk membuktikannya akan dibuat suatu pemodelan analisa rembesan pondasi menggunakan Software Plaxis Versi 8.6. Dimana akan diinputkan nilai Lugeon yang sudah dikonversikan menjadi nilai permeabilitas berdasarkan tahapan proses groutingnya. Tabel berikut ini merupakan nilai Lugeon yang sudah dikonversikan dalam bentuk satuan permeabilitas yang akan diinputkan kedalam program Plaxis Versi 8.6.

Tabel 5. Hasil Nilai Konversi Lugeon ke Permeabilitas Grouting Sta 15 Bagian Upstream

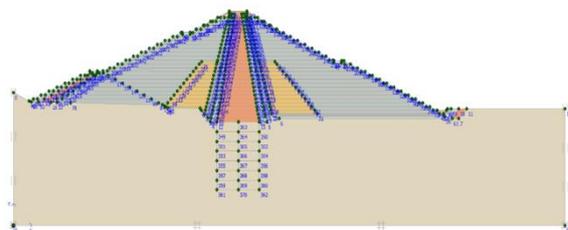
Location	Stage	Depth m	PILOT HOLE	PRIMARY HOLE	SECONDARY HOLE	TERTIARY HOLE	CHECK HOLE
			Upstream Line Permeability m/day				
MAIN DAM STA 15 BLOK 17	1	0 - 5 m	4.97E-01	2.66E-01	2.40E-01	2.76E-01	1.03E-02
	2	5 - 10 m	2.28E-03	1.32E-02	8.48E-02	1.57E-02	4.46E-03
	3	10 - 15 m	2.07E-02	6.04E-03	1.07E-02	1.11E-02	1.11E-02
	4	15 - 20 m	7.72E-03	7.29E-03	7.87E-03	7.74E-03	7.74E-03
	5	20 - 25 m	4.68E-03	6.63E-03	5.91E-03	7.34E-03	7.34E-03
	6	25 - 30 m	5.76E-03	5.49E-03	4.10E-03	4.39E-03	4.39E-03
	7	30 - 35 m	3.48E-03	6.63E-03	3.95E-03	6.92E-03	6.92E-03
AVERAGE			7.74E-02	4.45E-02	5.11E-02	4.71E-02	7.46E-03

Tabel 6. Hasil Nilai Konversi Lugeon ke Permeabilitas Grouting Sta 15 Bagian Downstream

Location	Stage	Depth m	PILOT HOLE	PRIMARY HOLE	SECONDARY HOLE	TERTIARY HOLE	CHECK HOLE
			Downstream Permeability m/day	Downstream Permeability m/day	Downstream Permeability m/day	Downstream Permeability m/day	Downstream Permeability m/day
MAIN DAM STA 15 BLOK 17	1	0 - 5 m	3.06E-01	1.54E-01	1.84E-01	5.25E-02	1.03E-02
	2	5 - 10 m	1.27E-02	2.06E-02	2.23E-02	2.12E-02	4.46E-03
	3	10 - 15 m	1.28E-02	1.42E-02	1.46E-02	1.60E-02	1.60E-02
	4	15 - 20 m	1.11E-02	8.54E-03	1.02E-02	1.12E-02	1.12E-02
	5	20 - 25 m	1.47E-02	6.42E-03	6.20E-03	6.38E-03	6.38E-03
	6	25 - 30 m	8.05E-03	3.21E-03	2.76E-03	4.08E-03	4.08E-03
	7	30 - 35 m	6.74E-03	1.90E-03	1.92E-03	2.05E-03	2.05E-03
AVERAGE			5.32E-02	2.98E-02	3.45E-02	1.62E-02	7.80E-03

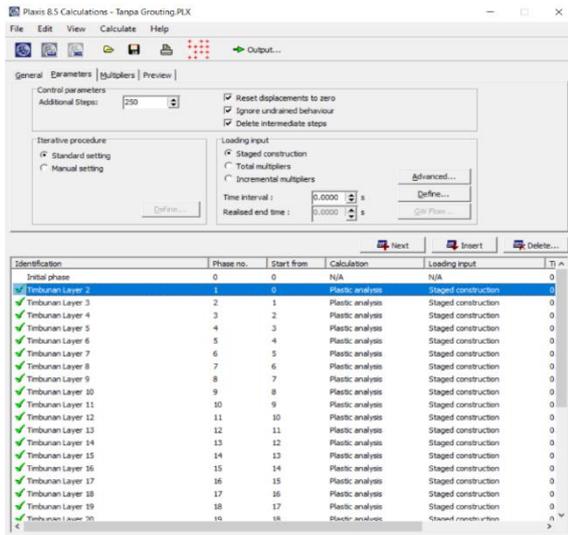
**Nilai Deformasi Pada Bendungan Lolak**

Pada pemodelan ini terdapat 28 layer timbunan setiap layernya diasumsikan setebal 2 meter. Hal ini dilakukan untuk mempermudah proses kalkulasi pada program Plaxis 8.5



Gambar 11. Pengaktifan Seluruh Material Timbunan

Sesudah proses pengaktifan seluruh material timbunan maka dilakukan kalkulasi pada setiap kondisi. Seperti yang dapat dilihat pada gambar 12 berikut ini.



Gambar 12. Kalkulasi Timbunan Layer 1 sampai dengan Timbunan Layer 28

Dari hasil kalkulasi dalam berbagai kondisi dapat diprediksi nilai penurunan yang terjadi selama proses penimbunan bendungan pada beberapa kondisi, hasilnya dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 7. Prediksi nilai penurunan yang terjadi selama proses penimbunan bendungan

Kondisi	Penurunan Zona Inti Bendungan (meter)
Setelah selesai konstruksi bendungan	0.159
Ketika elevasi muka air waduk sudah mencapai elevasi muka air normal El + 114 (MAN) kondisi aliran langgeng ( <i>steady seepage</i> )	0.153
Ketika elevasi muka air waduk sudah mencapai elevasi muka air banjir El +116 (MAB) kondisi aliran langgeng ( <i>steady seepage</i> )	0.177
Ketika kondisi genangan waduk mengalami kondisi penurunan muka air waduk surut cepat ( <i>sudden draw down</i> ) dari elevasi 116 (MAB) ke elevasi 114	0.144
Ketika kondisi muka air waduk mencapai elevasi muka air waduk maksimum (PMF) elevasi +119	0.186
Ketika elevasi muka air waduk sudah mencapai elevasi muka air normal El + 114 (MAN) kondisi aliran langgeng ( <i>steady seepage</i> ), terjadi gempa selama 0,1 detik	0.150
Ketika kondisi muka air waduk mencapai elevasi muka air waduk maksimum (PMF) elevasi +119 terjadi gempa selama 0,1 detik	0.184

Penurunan ijin untuk material zona inti bendungan lolak adalah 0.29 m, dan untuk penurunan ijin tubuh dan pondasi bendungan tidak boleh melebihi 1% dari tinggi bendungan yaitu 0,58 m. Nilai deformasi terbesar yang terjadi pada inti bendungan berdasarkan hasil *running* Program Plaxis adalah sebesar 0,186

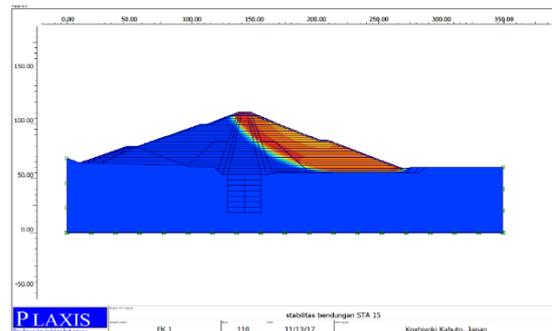
terjadi pada saat kondisi muka air waduk mencapai elevasi muka air banjir maksimum +119 (PMF) yaitu sebesar 0.186 m < 0.29 m (Syarat penurunan yang diijinkan).

Tabel 8. Syarat ijin penurunan bendungan Lolak

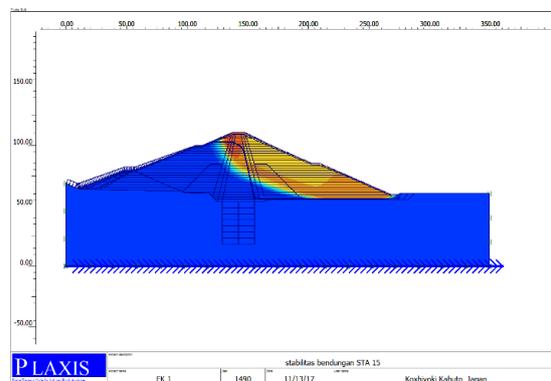
Material	Self weight settlement (m)
Zone 1 : filter Cijeunjing	0.5% x H, (H = 58 m)
Dam Body + Foundation	1.00% x H (H=58 m)

### Nilai Safety Factor Pada Bendungan Lolak

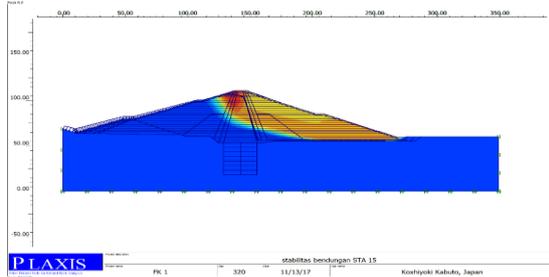
Nilai Faktor Keamanan Bendungan yang ditinjau dari berbagai skenario dari mulai sebelum pengisian waduk sampai dengan kondisi muka air waduk mencapai kondisi muka air banjir maksimum. Dari hasil analisa stabilitas bendungan dalam berbagai kondisi (skenario) kondisi bendungan dalam kondisi yang aman dikarenakan faktor keamanan dari hasil perhitungan menunjukkan lebih besar dari pada faktor keamanan yang diijinkan.



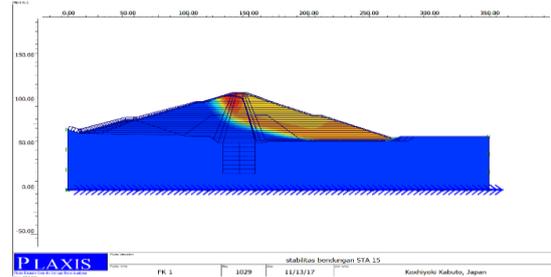
Gambar 13. Skenario 1 Kondisi Bendungan Sebelum Dilakukan Pengisian Muka Air Waduk



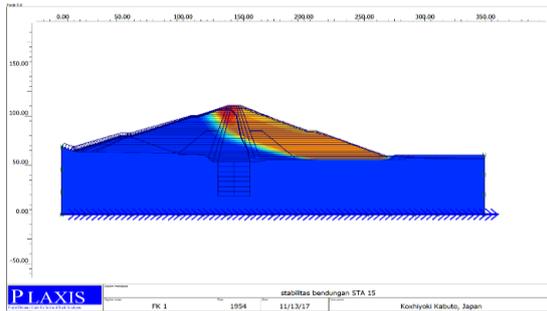
Gambar 14. Skenario 2 Kondisi Muka Air Waduk Mencapai El.+114 (Elevasi Muka Air Normal) dan Kondisi Aliran Rembesan Langgeng (*Steady Seepage*)



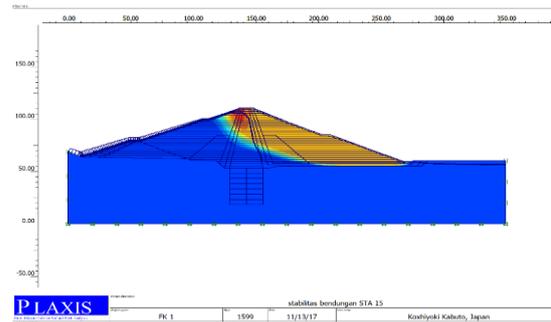
Gambar 15. Skenario 3 Kondisi Muka Air Waduk Mencapai El.+116 (Elevasi Muka Air Banjir) dan Kondisi Aliran Rembesan Langgeng (*Steady Seepage*)



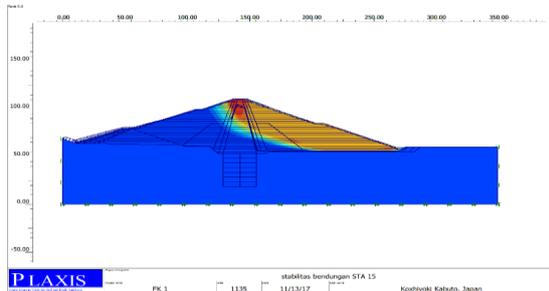
Gambar 19. Skenario 7 Kondisi Muka Air Waduk Mencapai El.+116 (Elevasi Muka Air Banjir) dan Kondisi Aliran Rembesan Langgeng (*Steady Seepage*) + Gempa Selama 0,1 Detik.



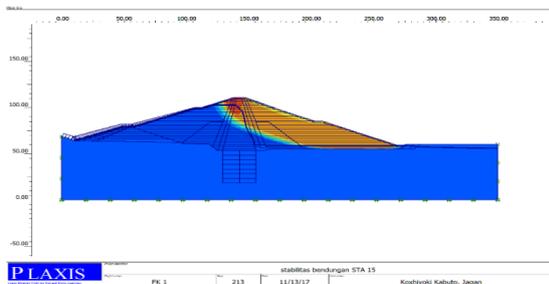
Gambar 16. Skenario 4 Kondisi Muka Air Waduk Mencapai El.+119 (Elevasi Muka Air Banjir Maksimum) dan Kondisi Aliran Rembesan Langgeng (*Steady Seepage*)



Gambar 20. Skenario 8 Kondisi Muka Air Waduk Mencapai El.+119 (Elevasi Muka Air Banjir) dan Kondisi Aliran Rembesan Langgeng (*Steady Seepage*) + Gempa Selama 0,1 Detik.



Gambar 17. Skenario 5 Kondisi Muka Air Waduk Surut Cepat (*Sudden Drawdown*) dari El.+116 (MAB) ke El.+90 dan Kondisi Aliran Rembesan Langgeng (*Steady Seepage*)



Gambar 18. Skenario 6 Kondisi Muka Air Waduk Mencapai El.+114 (Elevasi Muka Air Normal) dan Kondisi Aliran Rembesan Langgeng (*Steady Seepage*) + Gempa Selama 0,1 Detik.

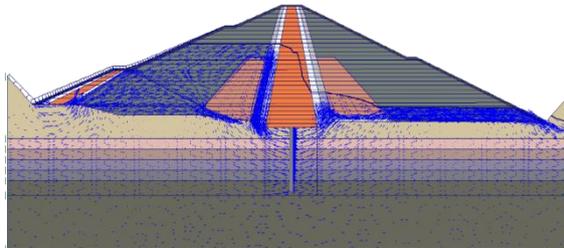
Dari hasil running program Plaxis *Phi/C* Reduction atau faktor keamanan bendungan dalam berbagai skenario dapat dilihat pada tabel di bawah ini;

Tabel 9. Hasil Running Program Plaxis *Phi/C* Reduction atau Faktor Keamanan Bendungan dalam Berbagai Skenario

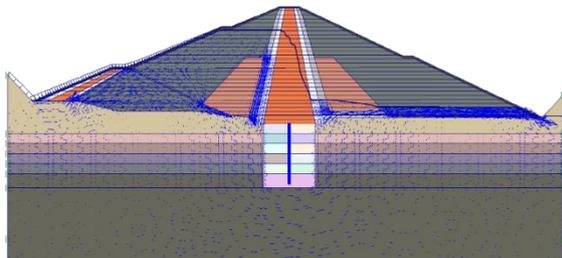
No	Skenario	Faktor Keamanan		Keterangan
		FK <sub>hitung</sub>	FK <sub>ijin</sub>	
1	Skenario 1 Kondisi Bendungan Pasca Konstruksi dan Belum diisi Muka Air Waduk	2.23	1.5	OK
2	Skenario 2 Kondisi Muka Air Waduk Sudah Mencapai El.+114 (MAN) dan Aliran Rembesan Langgeng ( <i>Steady Seepage</i> )	2.11	1.5	OK
3	Skenario 3 Kondisi Muka Air Waduk Sudah Mencapai El.+116 (MAB) dan Aliran Rembesan Langgeng ( <i>Steady Seepage</i> )	2.10	1.5	OK
4	Skenario 4 Kondisi Muka Air Waduk Sudah Mencapai El.+119 (PMF) dan Aliran Rembesan Langgeng ( <i>Steady Seepage</i> )	2.08	1.5	OK
5	Skenario 5 Kondisi Muka Air Waduk Surut Cepat ( <i>Sudden Drawdown</i> ) dari El.+116 sampai dengan El.+90	2.18	1.5	OK
6	Skenario 6 Kondisi Muka Air Waduk Sudah Mencapai El.+114 (MAN) dan Aliran Rembesan Langgeng ( <i>Steady Seepage</i> ) + Gempa Selama 0,1 detik.	2.16	1.2	OK
7	Skenario 7 Kondisi Muka Air Waduk Sudah Mencapai El.+116 (MAB) dan Aliran Rembesan Langgeng ( <i>Steady Seepage</i> ) + Gempa Selama 0,1 detik.	2.10	1.2	OK
8	Skenario 8 Kondisi Muka Air Waduk Sudah Mencapai El.+119 (PMF) dan Aliran Rembesan Langgeng ( <i>Steady Seepage</i> ) + Gempa Selama 0,1 detik.	2.08	1.2	OK

**Stabilitas Bendungan terhadap Rembesan dan Aliran Kecepatan Kritis**

Hasil output dari program Plaxis 8.6 untuk pola rembesan yang terjadi pada pondasi bendungan dengan tanpa penambahan *grouting* dan setelah adanya penambahan *grouting* pada pondasi bendungan.



Gambar 21. Pola Rembesan Tanpa Adanya Grouting pada Pondasi Bendungan dan Kondisi Muka Air Waduk Sudah Mencapai Elevasi +116 (MAB)



Gambar 22. Pola Rembesan Setelah Pondasi Bendungan ditambahkan Grouting dan Kondisi Muka Air Waduk Sudah Mencapai Elevasi +116 (MAB)

Dapat dijelaskan bahwa terdapat perbedaan pola rembesan jika tanpa adanya penambahan *grouting* dan sesudah terdapat *grouting* pada pondasi bendungan, alur rembesan air waduk tanpa adanya penambahan *grouting* langsung menembus pada bagian dasar pondasi zona inti bendungan hal tersebut dapat berpotensi terjadinya gerusan pada bagian dasar lapisan zona inti yang dapat membuat alur *piping* sehingga akan sangat berpotensi terjadinya *differential settlement* dan bocoran pada bendungan. Setelah adanya penambahan *grouting* pada pondasi bendungan sedalam 35 m pola rembesan menjadi berubah, air rembesan yang terjadi pada zona filter sebelah hulu bendungan lari kedalam pondasi bendungan namun pondasi lapisan dasar inti bendungan terlindungi atau kedap terhadap rembesan sehingga alur rembesan menjadi berada dibawah pondasi yang sudah dilakukan *grouting*, dan dapat mengurangi terjadi bocoran pada zona inti bendungan yang berasal dari air rembesan yang melewati pondasi bendungan.

Selanjutnya didapatkan hasil debit rembesan yang terjadi pada pondasi bendungan ketika kondisi muka air waduk sudah mencapai elevasi muka air banjir, terdapat 2 syarat rembesan yang diijinkan yaitu :

1. 0,005% dari volume tampungan waduk
2. 1% dari debit rata-rata sungai yang masuk kedalam waduk

Tabel 10. Hasil Output Program Plaxis Debit Rembesan yang Terjadi pada Pondasi Bendungan Berdasarkan Tahapan Grouting

No	Kondisi	Debit Rembesan (m <sup>3</sup> /sec/m)					Total Debit Rembesan (x) Bentang Bendungan	Syarat 1	Ket	Syarat 2	Ket
		Tanpa Grouting	Pilot Hole	Secondary Grouting	Tertiary Hole	Check Hole					
		m <sup>3</sup> /sec/m	m <sup>3</sup> /sec/m	m <sup>3</sup> /sec/m	m <sup>3</sup> /sec/m	m <sup>3</sup> /sec/m	m <sup>3</sup> /sec	m <sup>3</sup> /sec	m <sup>3</sup> /sec		
1	Kondisi muka air waduk normal (El +114)	1.39E-04	1.58E-04	4.33E-05	5.06E-05	7.91E-08	4.75E-05	9.26	1.10	Ok	Ok
2	Kondisi muka air waduk banjir (El +116)	1.70E-04	1.48E-04	4.61E-05	5.30E-05	8.28E-08	4.97E-05			Ok	Ok

Dari hasil analisa debit rembesan yang dapat dilihat pada tabel 4.13 dengan total debit rembesan yang terjadi adalah sebesar  $7,91 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{detik} \times 600 \text{ m}$  (bentang bendungan) =  $4,75 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{detik}$

Jika mengadopsi kriteria bahwa debit rembesan maksimum adalah  $0,05\% \times \text{gross storage capacity}$  per hari atau  $0,05\% \times 16.000.00 \text{ m}^3 \times 100 : (24 \times 60 \times 60) = 9,26 \text{ liter/detik}$  atau  $9,26 \text{ m}^3/\text{detik}$  maka debit rembesan dari hasil perhitungan masih lebih kecil terhadap kriteria debit rembesan yang diijinkan ( $9,26 \text{ m}^3/\text{detik} > 4,75 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{detik}$ )

Debit inflow rerata Sungai Lolak yaitu sebesar  $110 \text{ m}^3/\text{detik}$ , maka  $1\% \times 110 \text{ m}^3/\text{detik} = 11 \text{ m}^3/\text{detik} > 4,75 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{detik}$  debit rembesan hasil perhitungan masih lebih kecil terhadap kriteria debit rembesan yang diijinkan.

Sedangkan untuk menunjukkan hasil aliran kecepatan kritis yang terjadi pada bagian zona inti bendungan (zona 1), dapat dilihat pada table di bawah ini :

Tabel 11. Hasil Output Program Plaxis untuk Aliran Kecepatan Kritis Bagian Zona Inti Bendungan

No	Deskripsi (Kondisi)	Aliran Kecepatan Cm/det	Syarat	Ket
			cm/det	
1	Kondisi muka air waduk Normal (El +114)	5.30E-06	0.100	Ok
2	Kondisi muka air waduk banjir (El +116)	5.58E-06		Ok

Kecepatan maksimum yang diperoleh dari output program Plaxis untuk zona inti bendungan adalah  $5,58 \times 10^{-6}$  cm/detik, artinya kecepatan maksimum yang dihitung masih jauh lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan kritis yang diijinkan sehingga dapat disimpulkan berdasarkan hasil perhitungan bagian zona inti bendungan aman terhadap potensi *piping*. Untuk angka 0,10 cm/detik merupakan syarat yang diijinkan  $> 5,58 \times 10^{-6}$  cm/detik (hasil output program Plaxis).

## PENUTUP

Dari hasil yang dilakukan analisa yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

- Bendungan Lolak adalah aman, ditinjau dari angka keamanan terhadap nilai deformasi/penurunan yang terjadi pada tubuh bendungan khususnya pada zona inti 1, dimana angka maksimum deformasi yang terjadi dari hasil analisa yang telah dilakukan dalam beberapa kondisi yaitu 0.186 Meter. Angka tersebut lebih kecil dari syarat ijin

penurunan pada bendungan lolak yaitu sebesar 0,29 m.

- Bendungan Lolak masih masuk dalam kategori aman ditinjau dari nilai FK terhadap longsor lereng bendungan dalam berbagai kondisi, dimana FK yang dihitung berkisar antara 2.08 - 2.23. Angka tersebut masih lebih kecil dari FK ijin yang disyaratkan yaitu 1.2 untuk kondisi gempu dan 1.5 untuk kondisi tanpa gempu.
- Bendungan Lolak aman ditinjau dari rembesan dan aliran kecepatan kritis yang terjadi. Dari hasil Analisa yang telah dilakukan, total debit rembesan maksimum yang diprediksi terjadi adalah sebesar  $4,75 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/detik, angka tersebut lebih kecil dari kriteria debit rembesan yang diijinkan yaitu 9,26 m<sup>3</sup>/detik. Sedangkan untuk total Kecepatan maksimum yang diperoleh dari output program Plaxis untuk zona inti bendungan adalah  $5,58 \times 10^{-6}$  cm/detik, artinya kecepatan maksimum yang dihitung masih jauh lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan kritis yang diijinkan yang terjadi yaitu 0,10 cm/det.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bowles, Joseph E, 1993, Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah). (Edisi terjemahan oleh Johan K. Haimin). Erlangga: Jakarta
- Das, Braja M., Noor Endah, Indrasurya B. Mochtar, 1995, *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis)*-Jilid 2 Erlangga, Jakarta
- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2004. *Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa (Pd T14-2004-A)*. Jakarta
- Departemen Pekerjaan Umum, Direktorat Jenderal Pengairan, 1995. *Bendungan Besar di Indonesia*. Jakarta
- Hardiyatmo, H. C., 2002. *Mekanika Tanah 1*, Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Ditjen SDA, Satuan Kerja Balai Wilayah Sungai Sulawesi I, 2006, Study Kelayakan dan Analisa Dampak Lingkungan Bendungan Lolak;
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Ditjen SDA, Satuan Kerja Balai Wilayah Sungai Sulawesi I, 2009, Investigasi tambahan, Analisa Keruntuhan Bendungan Lolak;
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Ditjen SDA, Satuan Kerja Balai Wilayah Sungai Sulawesi I, 2012, Studi Grouting Bendungan Lolak;
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Ditjen SDA, Satuan Kerja Balai Wilayah Sungai Sulawesi I, 2014, Laporan Sertifikasi Bendungan Lolak.

North Carolina Department of Environment and Natural Resources, 2007

Plaxis. 2007. Dynamics Manual. Belanda : AN DELFT

Radhi Sinaro, 2007, Menyimak Bendungan di Indonesia 1910-2006. Bentara Adhi Cipta, Jakarta

Soedibyo. 1993. Teknik Bendungan. Pradnya Paramita, Jakarta.

Sosrodarsono, Suyono dan Kensaku Takeda. 1989. *Bendungan Type Urugan*. Pradnya Paramita, Jakarta.

Sosrodarsono, Suyono. 2007. *Menyimak Bendungan di Indonesia (1910 – 2006)*. Bentara Adhi Cipta, Jakarta.

United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1974, *Design of Small Dams*. Oxford & IBH publishing co. PVT.LTD.