

## ANALISA KONSOLIDASI DAN KESTABILAN LERENG BENDUNG KOSINGGOLAN

**Sesty E.J Imbar**

Alumni Program Pascasarjana S2 Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi

**O. B. A. Sompie**

Dosen Pasca Sarjana Program Studi S2 Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi

### ABSTRAK

*Peningkatan pembangunan dan pertumbuhan ekonomi khususnya pada daerah irigasi kosinggolan mensyaratkan kebutuhan konstruksi bendung yang mampu menampung cadangan air lebih banyak. Kesuksesan pembangunan konstruksi dan pegoperasian dam membutuhkan evaluasi yang komperhensif dalam desain dam sebelum dimulainya proses konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa faktor yang bisa mengakibatkan instability pada bendung serta analisa perilaku bendung Kosinggolan pada kondisi-kondisi kritis dengan memperhitungkan faktor keamanan bendung. Proses Konsolidasi merupakan faktor penting yang menjadi tujuan analisa karena bisa mengakibatkan penurunan yang sangat besar. Penelitian laboratorium dilakukan untuk mendapatkan sifat-sifat fisik dan mekanik tanah serta koefisien konsolidasi. Selanjutnya analisa dilakukan dengan menggunakan metode FEM (finite element method). Konsep model 2-D dari earth-fill dam disimulasikan pada program komputer Plaxis. Earthfill dam Kosinggolan model 2-D ini dapat diklasifikasikan stabil dimana faktor keamanan yang diperoleh berada pada range 1,52-1,59, diatas nilai minimum yang disyaratkan.*

*Kata kunci: Earth-fill dam, konsolidasi, kestabilan lereng, metode FEM, Plaxis, faktor keamanan.*

### PENDAHULUAN

Masalah pada konstruksi yang dibangun di atas tanah, seperti keretakan dinding dan penurunan antara lain disebabkan karena terjadi proses konsolidasi pada tanah yang merupakan proses keluarnya air dari pori tanah jenuh. Pada *earth-fill dam*, konsolidasi akan menyebabkan terjadinya penurunan. Penurunan ini akan berlangsung secara berangsur-angsur pada waktu yang panjang sampai kemudian memberikan total penurunan yang besar sehingga akhirnya mengakibatkan kerusakan pada struktur.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa perilaku dari *earth-fill dam* Kosinggolan, secara khusus memprediksi penurunan tanah dengan memperhitungkan konsolidasi yang terjadi pada bangunan dam serta analisa faktor keamanan lereng selama tahapan konstruksi dengan melakukan pengujian laboratorium serta menggunakan metode FEM yang diaplikasikan pada program komputer plaxis dengan melakukan simulasi kondisi kerja pada struktur

### LANDASAN TEORI

#### Teori Terzaghi tentang Konsolidasi Satu Arah

Terzaghi telah menemukan persamaan untuk menentukan kecepatan konsolidasi. Teori yang dikemukakan oleh Terzaghi ini didasarkan pada beberapa anggapan, antara lain pemampatan tanah dan aliran air pori hanya terjadi dalam arah vertikal, tanah bersifat homogen, koefisien pemampatan volume,  $m_v$ , dan koefisien permeabilitas seragam dan konstan, tidak ada perubahan volume yang terjadi pada butiran tanah atau air, tanah lempung dalam keadaan jenuh sempurna, hukum darcy berlaku pada seluruh gradien hidrolik, regangan kecil, tegangan total dan tegangan efektif pada semua bidang horisontal.

Persamaan yang dikemukakan Terzaghi ini diperoleh dengan menyelidiki elemen tanah yang mengalami konsolidasi. Dalam kondisi 1-D, dimana tidak ada perubahan pada ordinat horisontal, diperoleh:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{m_v \gamma_w}{k} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Karena  $u = \gamma_w h$ , dan ordinat vertikal dinyatakan dalam  $z$ , sehingga:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{m_v \gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2)$$

Hubungan  $\frac{k}{m_v \gamma_w}$  dapat diganti dengan koefisien tunggal yang disebut koefisien konsolidasi,  $c_v$ , dimana  $c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w}$

Persamaan tersebut kemudian menjadi persamaan konsolidasi satu arah (1-D) Terzaghi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3)$$

Tekanan air pori,  $u$ , selama konsolidasi adalah fungsi dari sifat tanah, waktu, dan tinggi lapisan tanah. Kecepatan konsolidasi bergantung pada kecepatan air mengalir keluar dari tanah, yaitu nilai koefisien rembesan  $k$  dan Volume air yang keluar dari tanah yang bergantung pada kompresibilitas tanah, yaitu parameter  $m_v$ . Sehingga bisa dilihat bahwa  $C_v$  merupakan fungsi dari  $k$  dan  $m_v$ . Selama proses konsolidasi,  $k$  dan  $m_v$  biasanya menurun sehingga  $c_v$  mungkin tetap. Pada umumnya, bertambahnya plastisitas tanah berarti berkurangnya daya rembesan dan bertambahnya kompresibilitas. Dengan demikian, nilai  $c_v$  berkurang secara cepat dengan bertambahnya indeks plastisitas.

Penyelesaian persamaan Terzaghi dapat ditulis dalam bentuk :

$$u = f \left\{ u, z, \frac{c_v t}{d^2} \right\} \text{ Atau } u = f(u, z, T) \quad (4)$$

Dimana  $T$  disebut faktor waktu dan tidak berdimensi, yaitu

$$T = \frac{c_v t}{d^2} \quad (5)$$

Tekanan air pori sebesar  $u$  pada persamaan di atas merupakan tekanan air pori kelebihan, yaitu tekanan yang disebabkan oleh pembebanan pada tanah. Dimana merupakan kelebihan dari tekanan keseimbangan air pori tanah semula.

### Perhitungan Penurunan

Terdapat tiga tahapan penurunan ( $S$ ) pada setiap massa tanah yang mengalami tegangan yaitu penurunan segera, penurunan konsolidasi primer dan penurunan konsolidasi sekunder.

Untuk menghitung kemungkinan penurunan yang disebabkan oleh konsolidasi

primer dengan menganggap bahwa konsolidasi tersebut adalah satu dimensi, dapat menggunakan persamaan-persamaan:

$$S = H \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (6)$$

pada lempung yang terkonsolidasi normal,

$$\Delta e = C_c (\log(p_0 + \Delta p) - \log p_0) \quad (7)$$

dimana  $C_c$  = kemiringan kurva  $e$  versus  $\log p$  dan didefinisikan sebagai “indeks pemampatan kembali” (*compression index*).

Dari dua persamaan tersebut, diperoleh persamaan :

$$S = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (8)$$

Penurunan konsolidasi total:

$$S_{\text{total}} = \left[ \left( \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \frac{p_2}{p_1} \right) + \left( C'_\alpha H \right) \log \frac{t_2}{t_1} \right] + \rho_i \quad (9)$$

## METODE ELEMEN HINGGA

Prinsip Finite Element Method adalah memecahkan persoalan yang rumit atau sukar dengan cara membagi-baginya menjadi bagian-bagian kecil sehingga menjadi lebih sederhana untuk penyelesaiannya. Proses pembagian elemen ini akan menghasilkan perhitungan yang sangat banyak. Sehingga perhitungan dilakukan dengan program komputer Plaxis.

### Teori Konsolidasi Pada Plaxis

Persamaan yang menentukan konsolidasi yang digunakan dalam PLAXIS mengikuti teori Biot. Hukum Darcy untuk aliran fluida dan perilaku elastis dari tanah juga diasumsikan. Rumus didasarkan pada teori regangan kecil Berdasarkan prinsip Terzaghi, tekanan dibagi menjadi tegangan efektif dan tekanan pori:

$$\sigma = \sigma' + m (p_{\text{steady}} + p_{\text{excess}}) \quad (10)$$

Untuk solusi keadaan tetap pada akhir proses konsolidasi adalah  $P_{\text{steady}}$ . Dalam Plaxis,

$$P_{\text{steady}} = \sum M_{\text{weight}} \cdot P_{\text{input}} \quad (11)$$

$P_{\text{input}}$  adalah tekanan pori yang dihasilkan pada input program berdasarkan garis freatik atau perhitungan aliran air tanah. Dalam PLAXIS tegangan bersifat tekan sehingga

dianggap negatif, ini diaplikasikan pada tegangan efektif seperti pada tekanan pori.

Untuk aplikasi perkiraan *finite element*, digunakan notasi standar:

$$\underline{u} = \underline{N} \underline{v} \quad \underline{u} = \underline{N} \underline{p}_n$$

$$\underline{\varepsilon} = \underline{B} \underline{v}$$

Dimana:

$\underline{v}$  = vector perpindahan *node*,

$\underline{P}_n$  = kelebihan tekanan pori,

$\underline{u}$  = vektor penurunan berkelanjutan dalam sebuah elemen,

$p$  = tekanan pori,

$\underline{N}$  = mengandung fungsi interpolasi dan

$\underline{B}$  = matriks interpolasi regangan

Dari persamaan penambahan keseimbangan dan mengaplikasikan perkiraan *finite element* di atas, diperoleh:

$$\int \underline{B}^T d\sigma dV = \int \underline{N}^T df dV + \int \underline{N}^T dt dS + r_0 \quad (12)$$

Dimana  $f$  adalah gaya tubuh yaitu berat sendiri dan  $t$  mewakili tenaga tarik permukaan. Biasanya vektor gaya residual  $r_0$  akan sama dengan nol. Dengan menambahkan vektor gaya residual prosedur perhitungan menjadi koreksi sendiri. Istilah  $dV$  menunjukkan integrasi volume dari tubuh yang diperhitungkan dan  $dS$  menunjukkan integral permukaan.

Pemisahan tegangan total menjadi tekanan pori dan tegangan efektif dan memperkenalkan hubungan dasar memberikan persamaan keseimbangan:

$$\underline{K} d\underline{v} + \underline{L} d\underline{P}_n = d\underline{f}_n \quad (13)$$

$\underline{K}$  adalah matriks kekakuan,  $\underline{L}$  adalah matriks pasangan dan  $d\underline{f}_n$  adalah vektor penambahan beban. Untuk merumuskan masalah aliran, persamaan kontinuitas diambil dari bentuk berikut

$$\nabla^T \underline{R} (\gamma_w y - P_{steady}) / \gamma_w - \underline{m}^T \frac{\partial \underline{\varepsilon}}{\partial t} + \frac{n}{K_w} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (14)$$

Dimana  $\underline{R}$  adalah matriks permeabilitas,  $N$  adalah porositas,  $K_w$  adalah modulus Bulk dari fluida dan  $\gamma_w$  adalah berat satuan dari fluida. Persamaan kontinuitas ini memasukkan tanda bahwa  $P_{steady}$  dan  $p$  diperhitungkan positif untuk tekan.

Mengaplikasikan elemen batas menggunakan prosedur Galerkin dan menggabungkan kondisi batas tertentu, diperoleh:

$$-\underline{H} \underline{P}_n + \underline{L}^T \frac{d\underline{v}}{dt} - \underline{S} \frac{d\underline{P}_n}{dt} = \underline{q} \quad (15)$$

Pada Plaxis, modulus Bulk dari fluida dapat diambil secara otomatis berdasarkan:

$$\frac{K_w}{n} = \frac{3(v_u - v)}{(1 - 2v_u)(1 + v)} K_{skeleton} \quad (16)$$

Dimana  $v_u$  memiliki nilai 0.495. Nilai ini dapat dimodifikasi dalam input program dengan dasar parameter  $B$  Skempton Untuk material teraliri dan material yang digantikan, modulus Bulk dari fluida dapat diabaikan. Persamaan Keseimbangan dan Kontinuitas dapat dirangkum dalam sebuah persamaan blok matriks

Menggunakan symbol  $\Delta$  untuk menunjukkan tambahan batas, integrasi memberikan:

$$\begin{bmatrix} \underline{K} & \underline{L}^T \\ \underline{L}^T & -\underline{S}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\underline{v} \\ d\underline{P}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \Delta t \underline{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{v}_0 \\ \underline{P}_{n0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta \underline{f}_n}{dt} \\ \Delta t \underline{q}_n^* \end{bmatrix} \quad (17)$$

Dimana

$$\underline{S}^* = \alpha \Delta t \underline{H} + \underline{S} \quad \underline{q}_n^* = \underline{q}_{n0}^* + \alpha \Delta \underline{q}_n$$

Dan  $\underline{v}_0$  dan  $\underline{P}_{n0}$  menunjukkan nilai pada permulaan dari tahapan waktu. Parameter  $\alpha$  adalah koefisien integrasi waktu. Pada program Plaxis, digunakan  $\alpha=1$

### Material Model *Earth-fill Dam*

*Earth-fill dam* diasumsikan homogen dan merupakan tanah lempung berpasir (*sandy clay*) dan dibangun pada tanah dasar lapisan lempung lunak (*soft clay*) dan pasir halus (*fine sand*). (Gambar 1. dan Tabel 1.)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Perilaku tegangan-regangan

Gambar 3. menunjukkan distribusi tegangan total dimana tegangan utama total ekstrim sebesar -329,33 kN/m<sup>2</sup>. Besaran tegangan diberikan pada setiap titik tegangan pada jaring elemen batas.

### Tekanan Air Pori

Dari evaluasi terlihat terdapat kelebihan tekanan air pori dimana dominan terjadi pada tubuh dam dengan prediksi distribusi besaran tekanan air pori berlebih terlihat pada Gambar 4. Kelebihan tekanan air pori terbesar bernilai 0.00368 kN/m<sup>2</sup> dalam arah

negatif (tekan). Tekanan air pori maksimum terjadi pada tahap awal konstruksi. Hal ini menunjukkan salah satu alasan mengapa tahapan konstruksi penting untuk dievaluasi.

### Mekanisme keruntuhan

Deformasi yang terjadi pada struktur terlihat pada Gambar 6, 7, 8. Gambar 6. menunjukkan mekanisme jaringan elemen yang terdeformasi dimana deformasi total diperlihatkan pada Gambar 7. Deformasi terjadi pada arah vertical dan horizontal dimana terjadi penurunan yang signifikan pada daerah puncak dam.

### Stabilitas Lereng dan Faktor Keamanan

Analisa terhadap faktor keamanan dibuat dengan melakukan asumsi reduksi nilai  $\phi$ - $c$ . hasil analisa diperlihatkan pada Gambar 9. Secara umum struktur earth-fill dam cukup aman untuk memikul beban. Baik pada awal konstruksi maupun pada akhir konstruksi.

## KESIMPULAN

Metode elemen hingga (FEM) cukup memberikan evaluasi yang komperhensif terhadap analisa perilaku earth-fill dam. Distribusi tegangan-regangan, tekanan air pori, prediksi deformasi dan penurunan serta

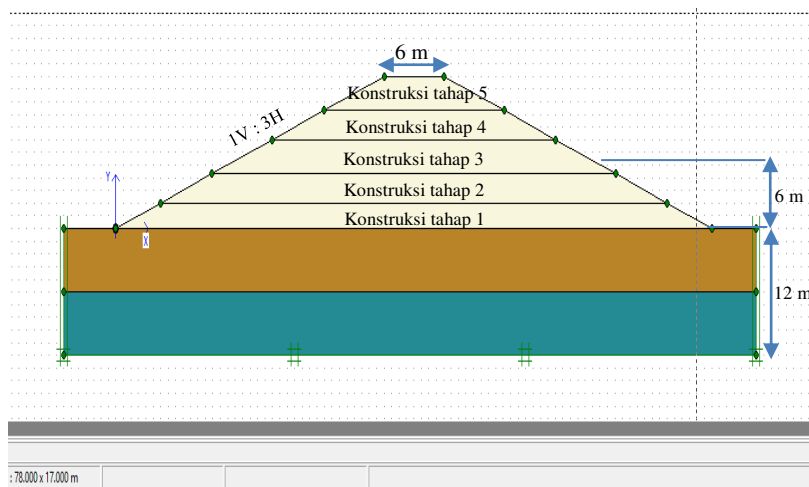
analisa kestabilan lereng bisa diperoleh lewat simulasi model dam.

Dari analisa hasil studi, terlihat bahwa *earth-fill dam* model 2-D yang disimulasikan dalam penelitian ini cukup stabil.

## DAFTAR PUSTAKA

- Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C., and Narayanan, R., 2001. *Hydraulic Structures*, Fourth Edition, Taylor and Francis Group, London.
- Wesley, Laurence D., 2012. *Mekanika Tanah untuk Tanah Endapan dan Residu*, Andy, Yogyakarta.
- Harlen, J., Wolski, W., 1996. *Embankments on Organic Soil*, Elsevier.
- Brinkgreve, R.B.J., Vermeer, P.A., 2002. *Plaxis 2D-Finite Element Code for Soil and Rock Analysis*. Delft University & Plaxis b.v., A.A Balkema/Rott/Brookfield, Netherlands.
- Duncan, J.M. (1996) State of Art: *Limit Equilibrium and Finite Element Analysis of Slopes*, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, 122(7); 577-596.

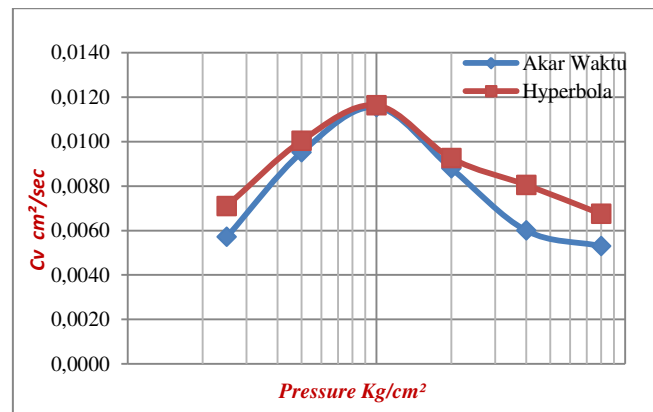
## LAMPIRAN



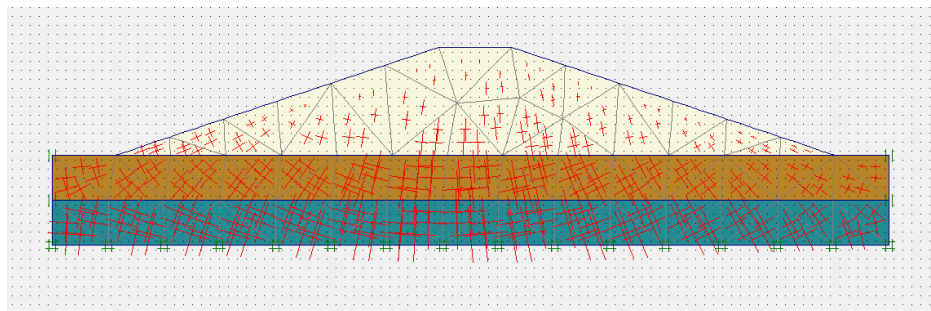
Gambar 1. Model 2-D Earth-fill Dam

Tabel 1. Data Parameter Tanah

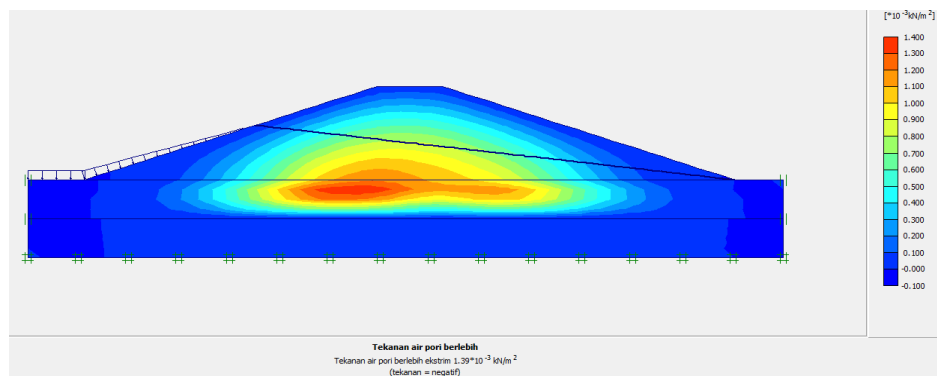
Mohr-Coulomb		Lapisan 1 (fine sand)	Lapisan 2 (soft clay)	Dam Kosinggolan
Type		Drained	Undrained	Undrained
$\gamma_{\text{unsat}}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	17.00	16.00	20.00
$\gamma_{\text{sat}}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	19.00	17.45	26.98
$k_x$	[m/day]	1.000	0.001	0.0095
$k_y$	[m/day]	1.000	0.001	0.0095
$e_{\text{init}}$	[-]	1.000	1.000	1.000
$E_{\text{ref}}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	12000	6000	15000
$\nu$	[-]	0.300	0.330	0.300
$c_{\text{ref}}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	2.00	20.00	7.65
$\phi$	[°]	24.84	10.00	14
$R_{\text{inter.}}$	[-]	1.00	1.00	1.00
Interface permeability		Neutral	Neutral	Neutral



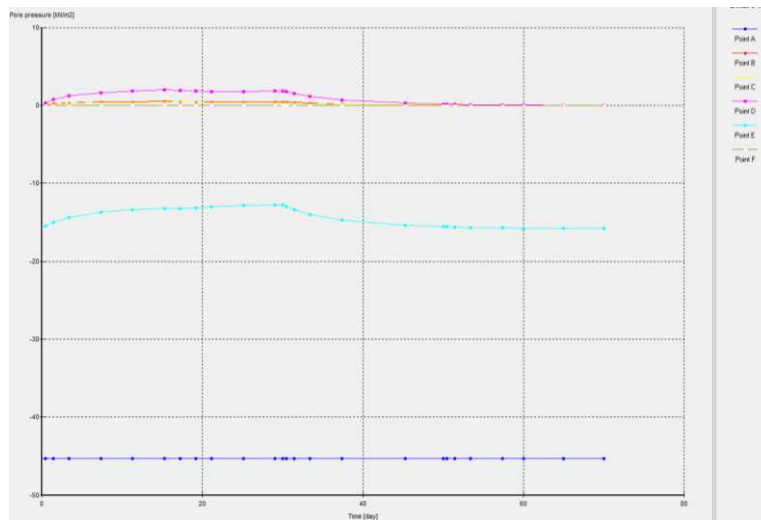
Gambar 2. Grafik Nilai Koefisien Konsolidasi (Cv) Metode akar waktu dan hyperbola



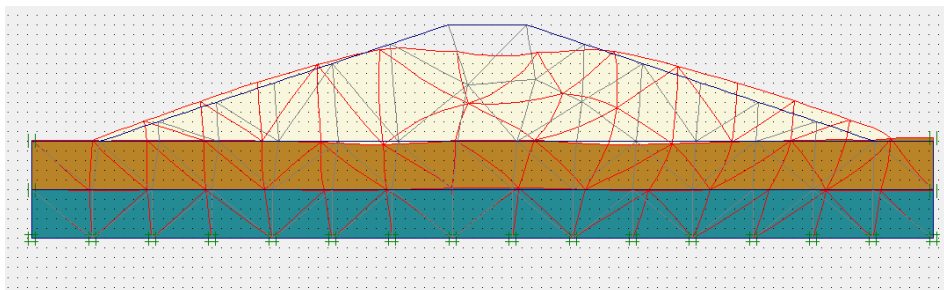
Gambar 3. Tegangan Total



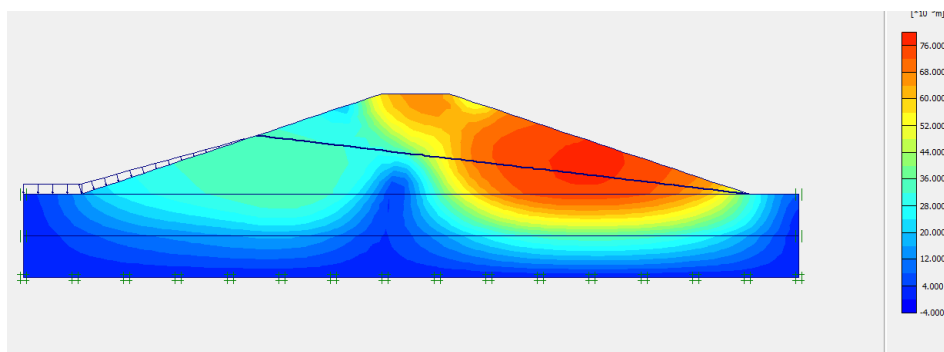
Gambar 4. Tekanan Air Pori Berlebih



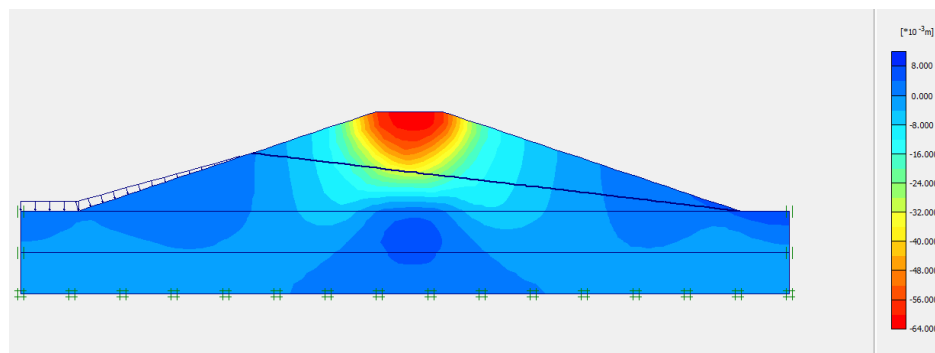
Gambar 5. Kurva Hubungan Tekanan Air Pori terhadap Waktu



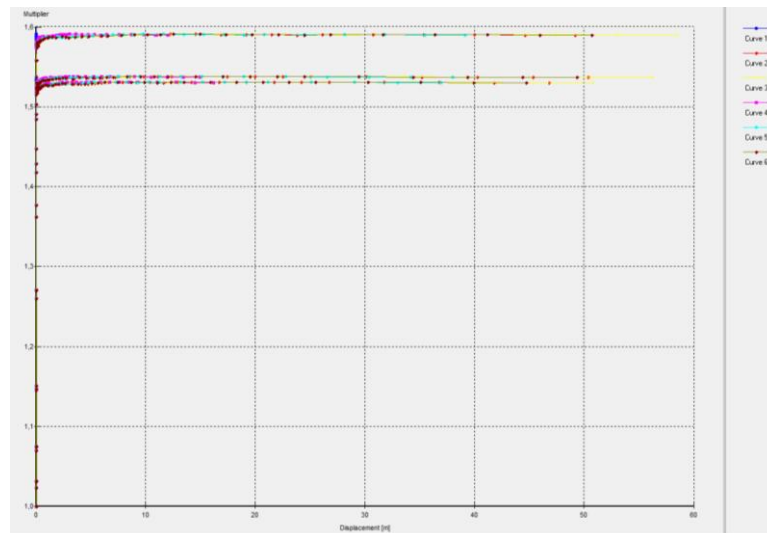
Gambar 6. Jaringan Elemen Terdeformasi



Gambar 7. Deformasi Total Struktur



Gambar 8. Deformasi Vertikal Struktur Dam



Gambar 9. Kurva Faktor Keamanan Struktur Dam