



**ANALISIS STABILITAS BENDUNGAN SELOREJO AKIBAT RAPID
DRAWDOWN BERDASARKAN HASIL SURVEY ELECTRICAL RESISTIVITY
TOMOGRAPHY (ERT)**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
Memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

AULIYA NUSYURA AL ISLAMI
NIM. 105060107111008-61

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2015



Repository Universitas Brawijaya

LEMBAR PERSETUJUAN

**ANALISIS STABILITAS BENDUNGAN SELOREJO AKIBAT RAPID
DRAWDOWN BERDASARKAN HASIL SURVEY ELECTRICAL RESISTIVITY
TOMOGRAPHY (ERT)**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
Memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

AULIYA NUSYURA AL ISLAMI
NIM. 105060107111008-61

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Eko Andi Suryo, ST., MT., Ph.D
NIP. 19761023 200604 1 002

Dr. Ir. Arief Rachmansyah
NIP. 19660420 199303 1 002



LEMBAR PERSETUJUAN

ANALISIS STABILITAS BENDUNGAN SELOREJO AKIBAT RAPID DRAWDOWN BERDASARKAN HASIL SURVEY ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY (ERT)

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
Memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

AULIYA NUSYURA AL ISLAMI
NIM. 105060107111008-61

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 29 Januari 2015

Penguji

Eko Andi Suryo, ST., MT., Ph.D
NIP. 19761023 200604 1 002

Penguji

Dr. Ir. Arief Rachmansyah
NIP. 19660420 199303 1 002

Penguji

Ir. Suroso, Dipl.HE, M.Eng
NIP 19520301 197603 1 001

Mengetahui

**Ketua Program Studi S1
Teknik Sipil Universitas Brawijaya**

Dr. Eng. Indradi W, ST, M. Eng (Prac)
NIP. 19810220 200604 1 002

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kita panjatkan kepada Allah SWT atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini dapat terselesaikan berkat bantuan, petunjuk dan bimbingan dari berbagai pihak yang telah banyak membantu proses penyelesaian tugas akhir ini, oleh karena itu tak lupa penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua yang telah memberikan banyak dukungan berupa doa, materi, nasihat hingga akhirnya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dan studi dengan lancar.
2. Bapak Eko Andi Suryo, ST, MT, Ph.D selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan dan arahan untuk kesempurnaan penulisan tugas akhir ini.
3. Dr. Ir. Arief Rachmansyah selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan dan arahan untuk kesempurnaan penulisan tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen Jurusan Teknik Sipil UB yang telah memberikan ilmu dan wejangan yang bermanfaat
5. Teman-teman Sipil 2010 yang banyak membantu selama di perkuliahan
6. Teman-teman KBM Al Hadiid FT UB, Adhit, Amir, Hamdani, Ilham, Rahmat dkk yang terus membersamai dan memberikan nasihat dan semangat untuk terus berjuang
7. Semua pihak dan teman-teman yang belum disebutkan yang telah banyak membantu dalam pelaksanaan survey serta masukan penyelesaian laporan.

Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca sekaligus dapat menjadi bahan acuan untuk penelitian lebih lanjut

Malang, Januari 2015

RINGKASAN

Auliya Nusyura Af Islami, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2015, Analisis Stabilitas Bendungan Selorejo Akibat *Rapid Drawdown* Berdasarkan Hasil Survey *Electrical Resistivity Tomography* (ERT), Dosen Pembimbing : Eko Andi Suryo dan Arief Rachmansyah

Bendungan Selorejo adalah bendungan tipe urugan yang terletak di desa Selorejo, kecamatan Ngantang, kabupaten Malang. Sebagai konstruksi yang sudah cukup berumur, bendungan ini memerlukan pemeriksaan sehubungan dengan keamanan konstruksi tersebut agar dapat terhindar dari kegagalan konstruksi. Salah satu kondisi kritis yang harus diperhatikan pada saat menganalisis stabilitas lereng bendungan urugan adalah kondisi *rapid drawdown* atau penurunan muka air cepat. Penurunan muka air cepat pada tubuh bendungan dapat mengubah kestabilan gaya pada tubuh bendungan. Dalam pemeriksaan kestabilan bendungan diperlukan model dari lapisan bawah permukaan bendungan. Cara yang paling umum dilakukan untuk mengetahui kondisi bawah permukaan tanah adalah dengan uji *bore hole*, namun ini tidak dapat dilakukan di bendungan karena dapat menyebabkan *piping* dan kebocoran. Salah satu alternatif untuk mengetahui lapisan tanpa merusak lapisan tanah adalah dengan metode *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) yang banyak digunakan untuk melakukan pemetaan pada lapisan bawah permukaan tanah. Namun metode ini membutuhkan data-data parameter tanah pendukung untuk memverifikasi hasil dari penginterpretasian tersebut

Pada penelitian ini dilakukan survey ERT pada tubuh bendungan selorejo untuk mengetahui kondisi bawah permukaannya sekarang, dengan metode Wenner pada arah memanjang. Setelah diketahui kemungkinan lokasi yang paling lemah, dilakukan lagi survey ke arah melintang yang hasilnya akan digunakan pada analisis stabilitas bendungan. Data parameter tanah juga dilengkapi dengan uji laboratorium untuk mengetahui hubungan penambahan kadar air terhadap nilai kohesi dan sudut geser pada material. Stabilitas bendungan terhadap *rapid drawdown* dianalisis menggunakan program Geostudio 2007 dengan variasi kecepatan penurunan selama 5, 10, 15, 20 dan 30 hari.

Dari penelitian ini dapat dilihat bahwa bendungan selorejo memiliki beberapa zona di tubuh bendungan yang memiliki resistivitas rendah dan diidentifikasi sebagai rembesan dan berpotensi memperlemah kestabilan bendungan. Dari hasil survey menunjukkan bahwa metode ERT tidak dapat menunjukkan perbedaan lapisan tanah pada bendungan dengan baik, karena ERT lebih mendeteksi keberadaan air yang menghantarkan listrik. Untuk analisis stabilitas bendungan berdasarkan hasil ERT menggunakan program geostudio menunjukkan keadaan tidak aman dengan faktor keamanan sebesar 0,962 pada bagian hilir dan untuk perhitungan analisis stabilitas akibat *rapid drawdown* menunjukkan bahwa bendungan selorejo tidak aman untuk dilakukan penurunan muka air dengan kecepatan penurunan 5 sampai 30 hari. Dari hasil coba-coba, didapatkan kecepatan penurunan minimal untuk tetap dalam keadaan aman adalah selama 60 hari, dengan faktor keamanan terkecil sebesar 1,050 pada hari ke 50.

Kata kunci: bendungan, *rapid drawdown*, stabilitas, *Electrical Resistivity Tomography*, faktor keamanan

SUMMARY

Auliya Nusyura Al Islami, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, January 2015, Analysis Selorejo Dam Stability due to Rapid Drawdown based on Survey Result of *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) , Supervisor : Eko Andi Suryo and Arief Rachmansyah

Selorejo Dam is embankment dam located in Selorejo village, Ngantang subdistrict, Malang district. As the construction that is quite old, this dam requires to check in connection with the security of the stability in order to avoid from failure construction. One of the critical conditions that must be considered when analyzing the stability of embankment dam slope is the condition of rapid drawdown or decrease water quickly. The decrease water quickly on body of dam can change stability of force on body of dam. The checking of dam stability requires model from low layer of dam surface. The most common way that is conducted to determine the condition under surface of the soil is by bore hole test, but it cannot be done on dam because can create piping and leak. One of alternative to determine the layer without damaging the layer of soil is by Electrical Resistivity Tomography (ERT) which is mostly conducted to do mapping on low layer of soil surface. But this method needs data of supporting soil parameter to verify the result of that interpretation.

In this research, ERT survey is conducted on body of Selorejo dam to know the condition under its surface now, by wenner method in lengthwise direction. After knowing the possibility of the weakest location, survey is conducted again in crosswise direction which the result will be used in dam stability analysis. Data of the soil parameters as well completed with a laboratory test to know the relationship of the addition water level on cohesion rates and shear angle in the material. The stability of dam in rapid drawdown is analyzed by Geostudio 2007 program with the variation of lowering speed for about 5,10, 15, 20 and 30 days.

From this research can be seen that Selorejo dam has some zones in body of dam which having low resistivity and identified as seepage and potentially weaken dam stability. From the result of survey, shows that ERT method cannot show well the difference soil layer in dam, because ERT is more detect to the existence of water that conduct electricity. To dam stability analysis based on ERT result using Geostudio program shows the unsafe condition with the safety factor about 0.962 on the downstream and to the calculation of stability analysis due to rapid drawdown shows that Selorejo dam is not safe to do the lowering of water surface with lowering speed until 30 days. From the result of trial and error, found minimal decrease speed to remain in a safe state is over 60 days, with the most critical safety factor of 1.050 at day 50th.

Keywords : Dam, rapid drawdown, stability, Electrical Resistivity Tomography, safety factor



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
BAB II KAJIAN PUSTAKA	4
2.1. Penyelidikan Tanah.....	4
2.2. Metode Geolistrik.....	4
2.3. Stabilitas Bendungan.....	7
2.3.1 Konsep Stabilitas Lereng.....	7
2.3.2 <i>Rapid Drawdown</i>	9
2.4. Metode untuk Menentukan Faktor Keamanan pada Bendungan.....	10
2.4.1 Metode Irisan Fellenius.....	10
2.4.2 Metode Bishop Disederhanakan (<i>Simplified Bishop Method</i>).....	12
2.5. Program GeoStudio.....	13
BAB III METODE PENELITIAN	15
3.1. Diagram Alir Pelaksanaan Studi.....	15
3.2. Lokasi dan Waktu Studi.....	16
3.3. Metode Pengumpulan Data.....	16
3.3.1 Data Primer.....	16
3.3.2 Data Sekunder.....	16
3.4. Metode Pengambilan Data.....	17
3.4.1 Data ERT.....	17
3.4.2 Data Tes Laboratorium.....	17
3.5. Metode Analisis Data.....	18



Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya
3.5.1	Pengolahan data.....	18
3.5.2	Analisis Stabilitas Lereng Bendungan.....	18
3.5.3	Data Bendungan.....	19
3.6.	Diagram Alir Analisis Data.....	22
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN.....		
4.1.	Umum.....	23
4.2.	Hasil Investigasi Geolistrik.....	23
4.3.	Hasil Pengujian Material.....	26
4.4.	Soil Layering.....	30
4.5.	Analisis Kestabilan Lereng Bendungan Selorejo.....	31
4.5.1	Input Data simulasi.....	31
4.5.2	Input Data pada Simulasi Program Geostudio 2007.....	32
4.5.3	Proses pada simulasi program Geostudio 2007.....	35
4.5.4	Analisa Hasil Simulasi Stabilitas <i>Line</i> 85.....	37
4.5.5	Analisa Hasil Simulasi Stabilitas <i>Line</i> 100.....	43
4.6.	Pembahasan.....	49
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		
5.1.	Kesimpulan.....	50
5.2.	Saran.....	50
DAFTAR PUSTAKA.....		
51		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ilustrasi Konsep Dasar Metode Geolistrik (NGA, 2000).....	5
Gambar 2.2 Model Geolistrik Metode <i>Resistivity</i> (NGA, 2000).....	5
Gambar 2.3 Konfigurasi Elektroda yang Umum Digunakan (Milsom, 2003).....	6
Gambar 2.4 Kondisi <i>Rapid Drawdown</i> (Craig, 2004).....	10
Gambar 2.5 Jaringan <i>Flow Net</i> Pada Saat <i>Drawdown</i> (Craig, 2004).....	10
Gambar 2.6 Sistem Gaya Pada Cara Fellenius.....	12
Gambar 2.7 Gaya-Gaya yang Bekerja Pada Potongan Tunggal (Murthy, 2002).....	12
Gambar 2.8 Gaya Pada Suatu Elemen Menurut Bishop (Murthy, 2002).....	13
Gambar 2.9 GeoStudio Starting Icon.....	14
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	15
Gambar 3.2 Lokasi Bendungan Selorejo.....	16
Gambar 3.3 Denah Bendungan Selorejo.....	20
Gambar 3.4 Potongan melintang Bendungan Selorejo.....	21
Gambar 3.5 <i>KeyIn Analyses</i> pada program Geostudio 2007.....	21
Gambar 3.6 Diagram alir pengolahan data.....	22
Gambar 4.1 Lokasi profil ERT pada tubuh bendungan.....	24
Gambar 4.2 Interpretasi survey ERT profil memanjang.....	25
Gambar 4.3 Interpretasi hasil survey ERT profil melintang A dan B.....	26
Gambar 4.4 Grafik hubungan nilai resistivitas terhadap kadar air.....	27
Gambar 4.5 Grafik hubungan kadar air terhadap ϕ dan kohesi pada <i>Fine Sand & Gravel</i>	27
Gambar 4.6 Grafik hubungan kadar air terhadap ϕ dan kohesi pada <i>Sand & Gravel</i>	28
Gambar 4.7 Grafik hubungan kadar air terhadap ϕ dan kohesi pada <i>tuff sand</i>	28
Gambar 4.8 Grafik hubungan kadar air terhadap ϕ dan kohesi pada <i>clay</i>	29
Gambar 4.9 Pembuatan Layer Lapisan Bendungan Berdasarkan Hasil ERT.....	30
Gambar 4.10 Plotting Hasil ERT ke Program Geostudio.....	30
Gambar 4.11 Input Koordinat Bendungan Selorejo pada Program Geostudio.....	32
Gambar 4.12 Koordinat yang Telah Dihubungkan Menjadi <i>Region</i>	33
Gambar 4.13 Input Data Material Bendungan pada Program Geostudio.....	33
Gambar 4.14 Input Tekanan Air Pori Pada Tubuh Bendungan.....	34
Gambar 4.15 Input Kondisi <i>Rapid Drawdown</i> pada Program Geostudio.....	34



Gambar 4.16 Proses Peletakan <i>Grid</i> dan <i>Radius</i>	35
Gambar 4.17 Proses Pencarian Titik Kritis dengan Kontur.....	36
Gambar 4.18 Proses Akhir Pemilihan Faktor Keamanan.....	36
Gambar 4.19 Analisis kondisi <i>rapid drawdown</i>	37
Gambar 4.20 Grafik faktor keamanan terhadap waktu pada line 85 dengan kecepatan penurunan 5 hari	38
Gambar 4.21 Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 85 dengan Kecepatan Penurunan 10 Hari	38
Gambar 4.22 Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 85 Dengan Kecepatan Penurunan 15 Hari	39
Gambar 4.23 Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 85 Dengan Kecepatan Penurunan 20 Hari	39
Gambar 4.24 Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 85 Dengan Kecepatan Penurunan 30 Hari	40
Gambar 4.25 Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 85 Dengan Kecepatan Penurunan 60 Hari	42
Gambar 4.26 Bidang Longsor Kritis Akibat Rapid Drawdown pada Line 85	41
Gambar 4.27 Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 100 Dengan Kecepatan Penurunan 5 Hari	44
Gambar 4.28 Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 100 Dengan Kecepatan Penurunan 10 Hari	44
Gambar 4.29 Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 100 Dengan Kecepatan Penurunan 15 Hari	45
Gambar 4.30 Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 100 Dengan Kecepatan Penurunan 20 Hari	45
Gambar 4.31 Grafik Perubahan Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 100 Dengan Kecepatan Penurunan 30 Hari.....	46
Gambar 4.32 Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 100 Dengan Kecepatan Penurunan 60 Hari	48
Gambar 4.33 Bidang Longsor Kritis Akibat Rapid Drawdown pada Line 100	47



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Hambatan Elektrik Tanah dan Batuan.....	6
Tabel 3.1 Data Material Lapisan Tanah Bendungan Selorejo.....	20
Tabel 4.1 Data spesifik material Bendungan Selorejo daerah lemah.....	29
Tabel 4.2 Kondisi simulasi stabilitas Bendungan Selorejo.....	31
Tabel 4.3 Rekapitulasi Faktor Keamanan Kondisi 1-4 <i>line</i> 85 dengan Simulasi Geostudio.....	37
Tabel 4.4 Faktor Keamanan Akibat <i>Rapid Drawdown</i> pada <i>line</i> 85.....	41
Tabel 4.5 Faktor Keamanan dengan Kecepatan Penurunan 60 Hari.....	42
Tabel 4.6 Rekapitulasi Faktor Keamanan Kondisi 1-4 <i>line</i> 100 dengan Simulasi Geostudio.....	43
Tabel 4.7 Faktor Keamanan Akibat <i>Rapid Drawdown</i> pada <i>line</i> 100.....	46
Tabel 4.8 Faktor Keamanan dengan Kecepatan Penurunan 60 Hari.....	48



BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Bendungan Selorejo adalah bendungan tipe urugan yang terletak di desa Selorejo, kecamatan Ngantang, Kabupaten Malang. Lokasinya berada pada kali Konto, anak sungai kali Brantas, tepat di bawah pertemuannya dengan kali Kwayangan, ± 50 meter di sebelah barat kota Malang, dengan ketinggian 625 mdpl (meter di atas permukaan laut). Bendungan ini mulai di bangun pada tahun 1963 dan selesai pada tahun 1970. (Kementerian Pekerjaan Umum, 2014)

Sebagai konstruksi yang sudah cukup berumur, bendungan ini memerlukan pemeriksaan sehubungan dengan keamanan konstruksi tersebut agar dapat terhindar dari kegagalan konstruksi. Kegagalan konstruksi akan terjadi apabila suatu konstruksi tidak mampu menahan beban luar yang bekerja padanya sehingga akan terjadi keruntuhan (*failure*) pada konstruksi tersebut dan konstruksi tersebut tidak dapat berfungsi sebagaimana mestinya.

Pemeriksaan pada tubuh bendungan khususnya pada bendungan tipe urugan tanah antara lain adalah pemeriksaan/kontrol terhadap stabilitas lereng dari bendungan, pemeriksaan terhadap rembesan yang terjadi pada tubuh bendungan dan juga pemeriksaan terhadap daya dukung tanah di bawah bendungan tersebut. Analisis stabilitas pada bendungan tersebut tentunya membutuhkan data *subsurface* dari bendungan tersebut untuk memperoleh hasil yang akurat.

Hal yang paling umum dilakukan untuk memperoleh data *subsurface* adalah dengan melakukan *drilling bore-hole* untuk mengidentifikasi lapisan tanah lereng (Craig, 2004). Namun metode tersebut kurang baik jika digunakan untuk mengidentifikasi lapisan bawah bendungan, karena dapat merusak struktur lapisan dan berpotensi menyebabkan piping dan kebocoran pada bendungan.

Salah satu alternatif yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi lapisan tanah adalah menggunakan metode *non destructive* yang memakai prinsip geofisika seperti Geolistrik atau *Electrical Resistivity Tomography* (ERT), yang banyak digunakan untuk melakukan pemetaan pada lapisan sub surface tanah. Namun demikian penggunaan ERT ini dalam analisa lereng tetap membutuhkan data parameter tanah dari *bore-hole drilling* (Craig, 2004)

Penerapan metode Geofisika untuk penyelidikan bawah permukaan memiliki keunggulan dibandingkan metode Geoteknik yang umum dipakai, yaitu durasi waktu pelaksanaan yang lebih singkat serta biaya yang lebih murah (Craig, 2004). Namun demikian, menambahkan bahwa penggunaan metode untuk menentukan kondisi subsurface perlu didampingi dengan data dari metode penyelidikan geoteknik langsung seperti, seperti *borehole* atau piezometer.

Dalam pembangunan bendungan urugan, perlu diperhatikan stabilitas lerengnya. Salah satu permasalahan yang harus dipertimbangkan dalam memperhitungkan nilai faktor keamanan lereng bendungan urugan adalah kondisi *rapid drawdown*, yaitu kondisi ketika muka air bendungan turun secara tiba-tiba. Hingga saat ini Bendungan Selorejo belum pernah mengalami kondisi *rapid drawdown*, sehingga perlu untuk dianalisis apakah aman jika dilakukan *drawdown* dengan kondisi bendungan sekarang.

Pada skripsi ini akan dibahas analisis stabilitas bendungan pada lereng bendungan akibat *rapid drawdown* berdasarkan hasil investigasi tanah menggunakan *Electrical Resistivity Tomography (ERT)*.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas pada skripsi ini adalah:

1. Bagaimana kondisi bawah permukaan Bendungan Selorejo berdasarkan hasil survey *Electrical Resistivity Tomography (ERT)*?
2. Bagaimana perbandingan antara hasil ERT dengan kondisi analisis *as built drawing*?
3. Bagaimana kondisi stabilitas Bendungan Selorejo akibat dari *rapid drawdown*?



1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah diperlukan untuk menyederhanakan dan mempermudah dalam analisa hitungan. Adapun perhitungan dibatasi pada:

1. Studi alternatif penyelidikan tanah dilakukan dengan membandingkan antara hasil interpretasi ERT dengan *as built drawing* bendungan
2. Analisa stabilitas dari tubuh Bendungan Selorejo yang meliputi stabilitas lereng dari bendungan pada saat normal dan akibat *rapid drawdown*
3. Tidak melakukan analisa hidrologi
4. Tidak melakukan analisa hidrolika
5. Data parameter tanah didapatkan dari PT Jasa Tirta sebagai pengelola Bendungan Selorejo

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui kondisi subsurface Bendungan Selorejo berdasarkan survey *Electrical Resistivity Tomography (ERT)*
2. Mengetahui perbandingan antara kondisi bendungan saat ini dengan kondisi *as built drawing*
3. Mengetahui stabilitas Bendungan Selorejo saat ini akibat *rapid drawdown*

Sedangkan maksud dari penulisan skripsi ini adalah untuk menerapkan ilmu yang diperoleh selama berada di bangku perkuliahan untuk diterapkan dalam kehidupan dan kondisi aktual di lapangan.



BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1. Penyelidikan Tanah

Sebuah penyelidikan tanah yang memadai merupakan awal penting untuk pelaksanaan proyek teknik sipil. Informasi yang cukup harus diperoleh untuk memungkinkan desain yang aman dan ekonomi yang akan dibuat dan untuk menghindari kesulitan selama konstruksi. Tujuan dilakukannya penyelidikan tanah adalah (Craig, 2004):

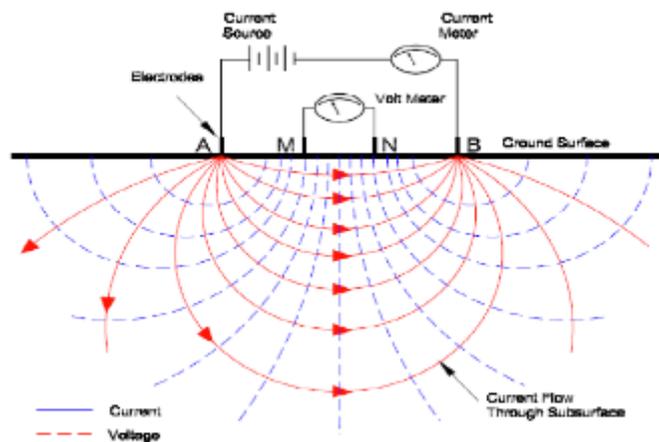
1. Untuk menentukan urutan, ketebalan, dan luas lateral dari suatu lapisan tanah, dan juga untuk menentukan lapisan tanah keras (*bedrock*).
2. Untuk memperoleh sampel yang representatif dari tanah dan batuan untuk identifikasi dan klasifikasi, dan jika diperlukan untuk digunakan di laboratorium untuk menentukan nilai-nilai parameter tanah tersebut.
3. Untuk mengidentifikasi kondisi air tanah.

Penyelidikan juga dapat mencakup pelaksanaan tes *in-situ* untuk menilai karakteristik tanah yang tepat. Pertimbangan tambahan timbul jika diduga tanah dapat terkontaminasi. Hasil penyelidikan tanah harus memberikan informasi yang memadai, misalnya, untuk menentukan jenis pondasi yang paling cocok untuk struktur yang direncanakan untuk dibangun dan untuk menunjukkan jika masalah-masalah khusus yang mungkin muncul selama penggalian.

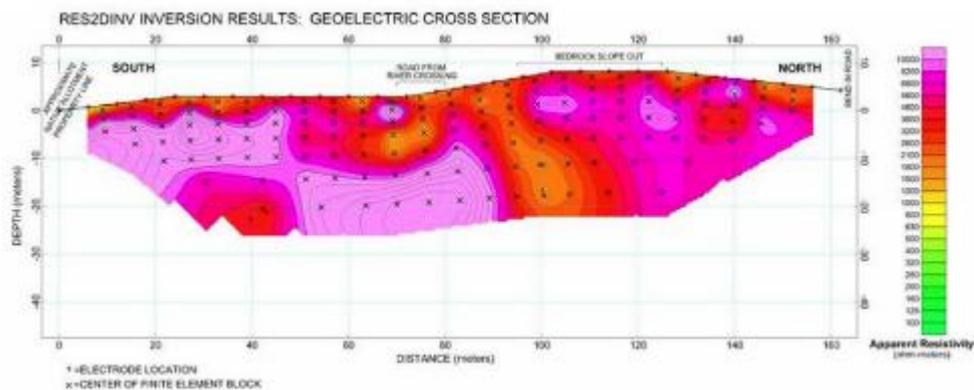
2.2. Metode Geolistrik

Metode geolistrik merupakan salah satu metode geofisika untuk mengetahui struktur lapisan tanah bawah permukaan dengan mendeteksi perubahan tahanan jenis lapisan batuan. Cara yang digunakan dengan mengalirkan arus listrik DC (*Direct Current*) yang mempunyai tegangan tinggi ke dalam tanah. Injeksi arus listrik ini menggunakan 2 buah elektroda arus A dan B yang ditancapkan ke dalam tanah dengan jarak tertentu. Semakin panjang jarak elektroda arus AB akan menyebabkan aliran arus listrik bias menembus lapisan batuan lebih dalam. Dengan adanya aliran arus listrik tersebut maka akan menimbulkan tegangan listrik di dalam tanah. Tegangan listrik yang terjadi di permukaan tanah diukur dengan menggunakan multimeter yang terhubung melalui 2 buah elektroda tegangan M dan N yang jaraknya lebih pendek daripada jarak elektroda AB. Bila jarak posisi elektroda AB diubah menjadi lebih besar maka tegangan

listrik yang terjadi pada elektroda MN ikut berubah sesuai dengan informasi jenis batuan yang ikut terinjeksi arus listrik pada kedalaman lapisan batuan yang bias ditembus oleh arus listrik ini sama dengan separuh dari jarak AB yang biasa disebut $AB/2$ (bila digunakan arus listrik DC murni), maka diperkirakan pengaruh dari injeksi aliran arus listrik ini berbentuk setengah bola dengan jari-jari $AB/2$. Metode ERT bisa digunakan untuk mendeteksi retakan dalam lereng tanah. Gambar 4 dibawah ini menunjukkan skema 2D hasil pengukuran ERT di daerah Alaska. Metode ERT inidilaksanakan sebagai bagian dari proyek penyelidikan sumber air.



Gambar 2.1 Ilustrasi Konsep Dasar Metode Geolistrik (NGA, 2000)



Gambar 2.2 Model Geolistrik Metode Resistivity (NGA, 2000)

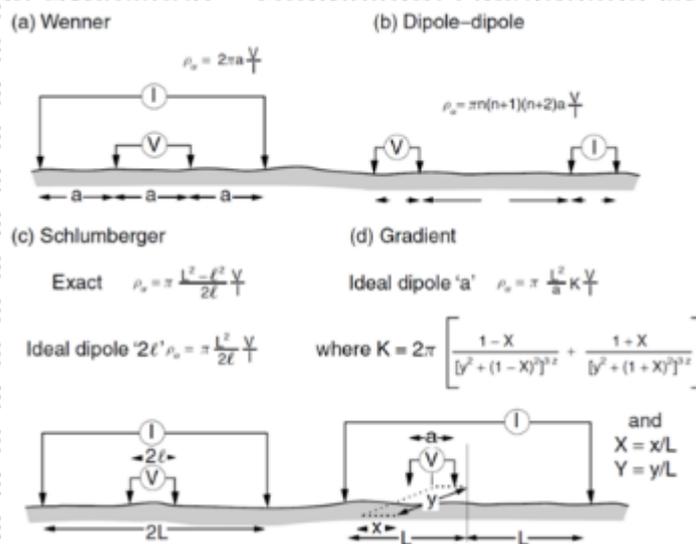
Metoda geolistrik terdiri dan beberapa jenis, di antaranya metoda polarisasi imbas (*induce polarization, IP*), metoda potensial diri (*self potential, SP*) dan metoda geolistrik tahanan jenis (*resistivity*). Metoda geolistrik tahanan jenis yang dikenal juga dengan sebutan metoda resistivitas merupakan metoda yang bersifat dinamik (aktif), karena menggunakan gangguan aktif berupa injeksi arus yang dipancarkan ke bawah permukaan bumi.

Metode ERT menentukan jenis tanah menggunakan perbedaan hambatan listrik di masing-masing jenis tanah yang diteliti. Aliran arus listrik dapat bergerak melalui tanah akibat adanya aliran elektrolit. Oleh karena itu, kadar air dan konsentrasi garam dapat mempengaruhi resistivitas tanah. Misalnya, tanah yang jenuh air dengan angka pori tinggi akan terdeteksi sebagai tanah dengan resistivitas rendah, karena jumlah air pori dan ion bebas dalam air yang signifikan.

Tabel 2.1 Hambatan Elektrik Tanah dan Batuan

Material	Resistensi dalam Ohm-meter
Lempung atau lanau organik jenuh	5 – 20
Lempung atau lanau anorganik jenuh	10 – 50
Lempung dan lanau jenuh sebagian; pasir jenuh dan kerikil	50 – 150
Lempung kering dan lanau	100 – 500
Batu pasir, pasir kering, dan kerikil	200 – 2000
Batu kristal	1000 – 10000

Survey ERT berkaitan erat dengan geometri susunan elektroda arus dan potensial yang digunakan. Beberapa konfigurasi elektroda yang umum digunakan adalah Schlumberger, Wenner, Dipole-dipole, dan Gradient Array. Gambar 2 menggambarkan skema konfigurasi *array* elektroda dari masing-masing metode tersebut.



Gambar 2.3 Konfigurasi Elektroda yang Umum Digunakan (Milsom, 2003)



Survei resistivitas akan memberikan gambaran tentang distribusi resistivitas bawah permukaan. Harga resistivitas tertentu akan berasosiasi dengan kondisi geologi tertentu. Untuk mengkonversi harga resistivitas ke dalam bentuk geologi diperlukan pengetahuan tentang tipikal dari harga resistivitas untuk setiap tipe material dan struktur daerah survey. Harga resistivitas batuan, mineral, tanah dan unsur kimia secara umum telah diperoleh melalui berbagai pengukuran dan dapat dijadikan sebagai acuan untuk proses konversi (Telford, *et al.*, 1990).

2.3. Stabilitas Bendungan

Analisa dan perhitungan untuk stabilitas tubuh bendungan urugan, terdiri dari 3 kegiatan utama, yaitu:

1. Mengadakan analisa dan inventarisasi terhadap gaya-gaya yang akan bekerja pada tubuh bendungan.
2. Mengadakan analisa-analisa dan perhitungan-perhitungan pada stabilitas lereng-lereng calon tubuh bendungan
3. Mengadakan analisa-analisa dan perhitungan-perhitungan pada stabilitas calon tubuh bendungan terhadap gaya-gaya yang timbul oleh adanya aliran filtrasi di dalam tubuh bendungan tersebut

2.3.1 Konsep Stabilitas Lereng

Analisis stabilitas didasarkan pada konsep umum keseimbangan batas (*General Limit Equilibrium*), untuk menghitung faktor keamanan (SF) yang melawan gaya runtuh pada stabilitas lereng tersebut. Faktor keamanan digambarkan dimana pergeseran tanah harus dikurangi dengan menempatkan massa tanah pada daerah batas keseimbangan sepanjang daerah longoran. Faktor keamanan didefinisikan:

$$FK = \frac{S_f}{S_d} \quad (2-1)$$

Dengan :

FK = Angka faktor keamanan terhadap kekuatan tanah

S_f = kekuatan geser rata-rata dari tanah (kN/m^2)

S_d = Tegangan geser rata-rata yang bekerja sepanjang bidang longsor (kN/m^2)

Pada umumnya suatu lereng dapat dikatakan stabil apabila faktor keamanannya lebih besar dari pada satu. Kestabilan lereng tergantung dari kekuatan geser tanahnya. Pergeseran tanah terjadi karena adanya gerakan relatif antara butir-butir tanah. Oleh karena itu, kuat geser tanah tergantung pada gaya yang bekerja antara butir-butirnya. Tanah yang padat dengan susunan butir seperti pembagian ukuran butir *interlocking* dan besarnya kontak antara butir, lebih besar kekuatannya dari tanah yang lepas (Braja M. Das.,1993)

Beberapa kondisi yang dianggap paling tidak menguntungkan pada sebuah bendung urugan (Sosrodarsono & Takeda, 2002):

1. Waduk dalam keadaan penuh dan aliran air filtrasi dalam tubuh bendungan bersifat laminar.
2. Dalam tubuh bendungan dianggap masih terdapat tekanan air pori yang timbul pada saat segera sesudah bendungan selesai dibangun.
3. Waduk dalam keadaan terisi setengah dan aliran air filtrasi dalam tubuh bendungan bersifat laminar.
4. Dalam keadaan permukaan air dalam waduk berfluktuasi dengan intensitas yang besar, tapi dengan periode yang pendek. Demikian pula saat terjadinya gejala penurunan mendadak permukaan air waduk dari elevasi permukaan penuh kepada elevasi permukaan terendah.
5. Pada waduk yang relatif kecil biasanya terjadi kenaikan-kenaikan permukaan waduk yang melebihi elevasi permukaan penuhnya, maka diperlukan pemeriksaan stabilitas tubuh bendungan pada saat permukaan air waduk mencapai elevasi tertinggi tersebut.
6. Walaupun elevasi permukaan direncanakan dalam keadaan konstan, tetapi diperlukan pemeriksaan jika penurunan mendadak dapat juga terjadi dari elevasi permukaan tersebut kepada elevasi permukaan terendah.
7. Pada bendungan urugan dengan zone-zone kedap air yang relatif tebal, sisa tekanan air pori yang timbul pada saat dilaksanakannya penimbunan terkombinir dengan tekanan hidrostatis dari air dalam waduk yang pengisiannya dilakukan dengan cepat.
8. Pada bendungan urugan yang waduknya direncanakan untuk menampung banjir besar abnormal, maka stabilitas bendungan perlu

diperiksa pada elevasi permukaan tertinggi guna menampung volume banjir abnormal tersebut.

2.3.2 Rapid Drawdown

Rapid drawdown atau penurunan muka air secara cepat merupakan satu kondisi kritis yang harus diperhatikan ketika menghitung kestabilan lereng suatu bendungan atau tanggul. Pada saat *drawdown* terjadi, penurunan muka air di waduk akan mengakibatkan perubahan pada distribusi tekanan air pori. Lereng bagian hilir yang sebelumnya menerima tekanan air sebagai penyeimbang, tiba-tiba kehilangan tekanan tersebut. Sementara itu, tekanan air pori di tubuh bendungan tidak dapat turun secepat muka air, sehingga terjadi tekanan air pori berlebih (*excess pore pressure*) yang akibatnya membuat lereng tidak stabil (E. Alonso, 2009). Mengacu pada Gambar 3, tekanan air pori sebelum *drawdown* pada titik P dapat dihitung dengan:

$$u_0 = \gamma_w (h + h_w - h') \quad (2-2)$$

dimana h' adalah hilangnya total ketinggian akibat rembesan antara permukaan lereng hulu dan titik P. Hal ini lagi diasumsikan bahwa total tegangan prinsipal utama di P adalah sama dengan tekanan isi. Perubahan total tegangan prinsipal utama disebabkan karena hilangnya seluruh atau sebagian air di atas lereng setinggi P (Craig, 2004). Untuk kedalaman penurunan melebihi h_w :

$$\Delta\sigma_1 = -\gamma_w h_w \quad (2-3)$$

dan perubahan tekanan air pori kemudian dapat dihitung:

$$\begin{aligned} \Delta u &= \bar{B} \Delta\sigma_1 \\ &= -\bar{B} \gamma_w h_w \end{aligned} \quad (2.4)$$

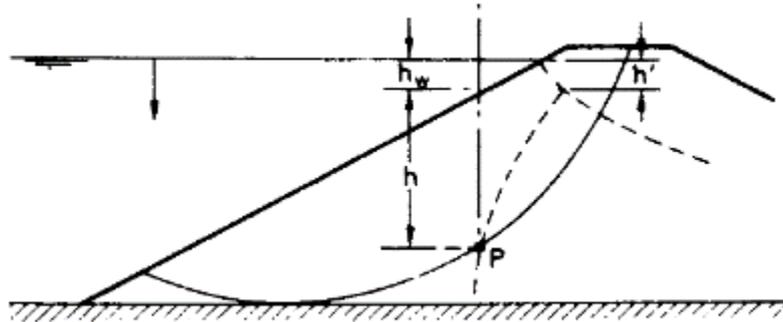
Oleh karena itu tekanan air pori pada P segera setelah *drawdown* adalah

$$\begin{aligned} u &= u_0 + \Delta u \\ &= \gamma_w \{h + h_w (1 - \bar{B}) - h'\} \end{aligned} \quad (2.5)$$



Maka

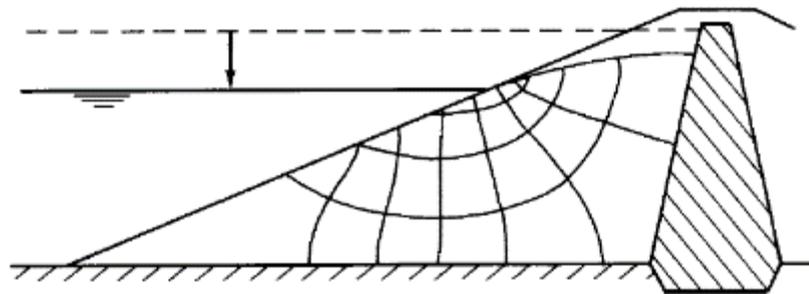
$$r_w = \frac{u}{\gamma_{sat} h} = \frac{\gamma_w}{\gamma_{sat}} \left\{ 1 + \frac{h_w}{h} (1 - B) - \frac{h'}{h} \right\} \quad (2.6)$$



Gambar 2.4 Kondisi *Rapid Drawdown* (Craig, 2004)

Pada saat terjadi penurunan, garis jenuh bergerak ke bawah tergantung pada permeabilitas tanah. Serangkaian jaring aliran dapat digambarkan untuk melihat perbedaan posisi dari garis saturasi dan nilai-nilai tekanan air pori yang diperoleh.

Contoh jaring aliran rembesan ditunjukkan pada Gambar 4. (Craig, 2004)



Gambar 2.5 Jaring *Flow Net* Pada Saat *Drawdown* (Craig, 2004)

2.4. Metode untuk Menentukan Faktor Keamanan pada Bendungan

2.4.1 Metode Irisan Fellenius

Cara irisan Fellenius dapat dipakai pada lereng-lereng dengan kondisi isotropis, non isotropis dan berlapis-lapis. Massa tanah yang bergerak diandaikan terdiri atas beberapa elemen vertikal. Lebar elemen dapat diambil tidak sama dan sedemikian sehingga lengkung busur di dasar elemen dapat dianggap garis lurus (Departemen Pekerjaan Umum, 1987).



Berat "total" tanah/batuan pada suatu elemen (W_t) termasuk beban luar yang bekerja pada permukaan lereng (Gambar 5 dan 6). W_t diuraikan dalam komponen tegak lurus dan tangensial pada dasar elemen. Dengan cara ini pengaruh gaya T dan E yang bekerja di samping elemen diabaikan. Faktor keamanan adalah perbandingan momen penahan longsor dengan penyebab longsor. Pada Gambar 2.10 momen tahanan geser pada bidang longsor adalah (Departemen Pekerjaan Umum, 1987):

$$M_{\text{penahan}} = R \cdot r \quad (2.7)$$

dimana R adalah gaya geser dan r adalah jari-jari bidang longsor. Tahanan geser pada dasar tiap elemen adalah:

$$R = S \cdot l = l (c' + \sigma \tan \phi'); \quad \sigma = \frac{W_t \cos \alpha}{l} \quad (2.8)$$

Momen penahan yang ada sebesar :

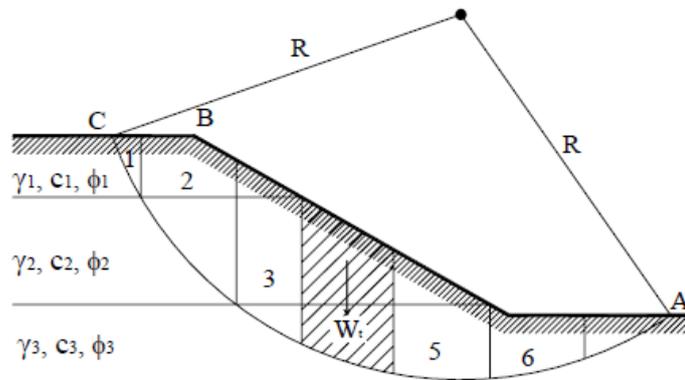
$$M_{\text{penahan}} = r (c'l + W_t \cos \alpha \tan \phi') \quad (2.9)$$

Komponen tangensial W_t bekerja sebagai penyebab longsor menimbulkan momen penyebab :

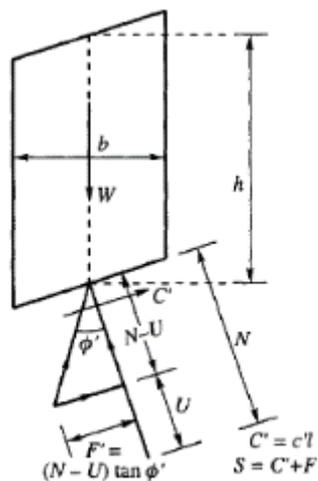
$$M_{\text{penyebab}} = (W_t \sin \alpha) \cdot r \quad (2.10)$$

Faktor keamanan dari lereng menjadi :

$$FK = \frac{\sum (c' + W_t \cos \alpha \tan \phi')}{\sum (W_t \sin \alpha)} \quad (2.11)$$



Gambar 2.6 Sistem Gaya Pada Cara Fellenius



Gambar 2.7 Gaya-Gaya yang Bekerja Pada Potongan Tunggal (Murthy, 2002)

2.4.2 Metode Bishop Disederhanakan (*Simplified Bishop Method*)

Cara analisis yang dibuat oleh A.W. Bishop (1955) menggunakan cara elemen dimana gaya yang bekerja pada tiap elemen ditunjukkan seperti pada Gambar 7. Persyaratan keseimbangan yang diterapkan pada elemen yang membentuk lereng tersebut. Faktor keamanan terhadap keruntuhan didefinisikan sebagai perbandingan kekuatan geser maksimum yang dimiliki tanah di bidang longsoran ($S_{tersedia}$) dengan tahanan geser yang diperlukan untuk keseimbangan (S_{perlu}) (Departemen Pekerjaan Umum, 1987)

$$FK = \frac{S_{tersedia}}{S_{perlu}}$$

Bila kekuatan geser tanah adalah:

$$S_{tersedia} = c' + (\sigma - \mu) \tan \phi' = c' + \sigma' \tan \phi'$$

maka tahanan geser yang diperlukan untuk keseimbangan adalah:

$$S_{\text{perlu}} = \frac{1}{FK} (c' + (\sigma - \mu) \tan \phi') \quad (2.12)$$

Faktor keamanan dihitung berdasar rumus:

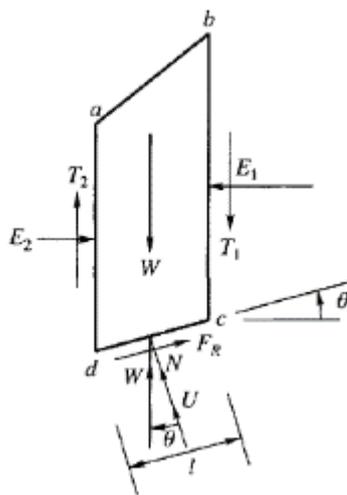
$$FK = \frac{\sum_m (c' l + (W \cos \theta - \mu l) \tan \phi')}{W \sin \alpha} \quad (2.13)$$

$$\text{dengan } m = \frac{1}{\cos \theta + \frac{\tan \phi' \sin \theta}{FK}}$$

Cara penyelesaian merupakan coba ulang (*trial and error*) harga faktor keamanan FK di ruas kiri persamaan (2.13), dengan menggunakan Gambar 2.8 untuk mempercepat perhitungan (Departemen Pekerjaan Umum, 1987)

Faktor keamanan menurut cara ini menjadi tidak sesuai dengan kenyataan, terlalu besar, bila sudut negatif (-) di lereng paling bawah mendekati 30° (Gambar 7)

Kondisi ini bisa timbul bila lingkaran longsor sangat dalam atau pusat rotasi yang diandaikan berada dekat puncak lereng. Faktor keamanan yang diperoleh dengan cara ini lebih besar daripada dengan cara Fellenius (Departemen Pekerjaan Umum, 1987)



Gambar 2.8 Gaya Pada Suatu Elemen Menurut Bishop (Murthy, 2002)

2.5. Program GeoStudio

GeoStudio adalah sebuah paket aplikasi untuk pemodelan geoteknik dan geolingkungan. Software ini melingkupi SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W, QUAKE/W, TEMP/W, dan CTRAN/W yang bersifat terintegrasi sehingga memungkinkan untuk menggunakan hasil dari satu program ke program lainnya. Ini unik dan fitur yang kuat sangat memperluas jenis masalah yang dapat dianalisis dan memberikan fleksibilitas untuk memperoleh modul seperti yang dibutuhkan untuk proyek yang berbeda.

SLOPE/W merupakan produk perangkat lunak untuk menghitung faktor keamanan tanah dan kemiringan batuan. Dengan SLOPE / W, kita dapat menganalisis masalah baik secara sederhana maupun kompleks dengan menggunakan salah satu dari delapan metode kesetimbangan batas untuk berbagai permukaan yang miring, kondisi tekanan pori-air, sifat tanah dan beban terkonsentrasi. Kita dapat menggunakan elemen tekanan pori air yang terbatas, tegangan statis, atau tekanan dinamik pada analisis kestabilan lereng. Anda juga dapat melakukan analisis probabilistik.



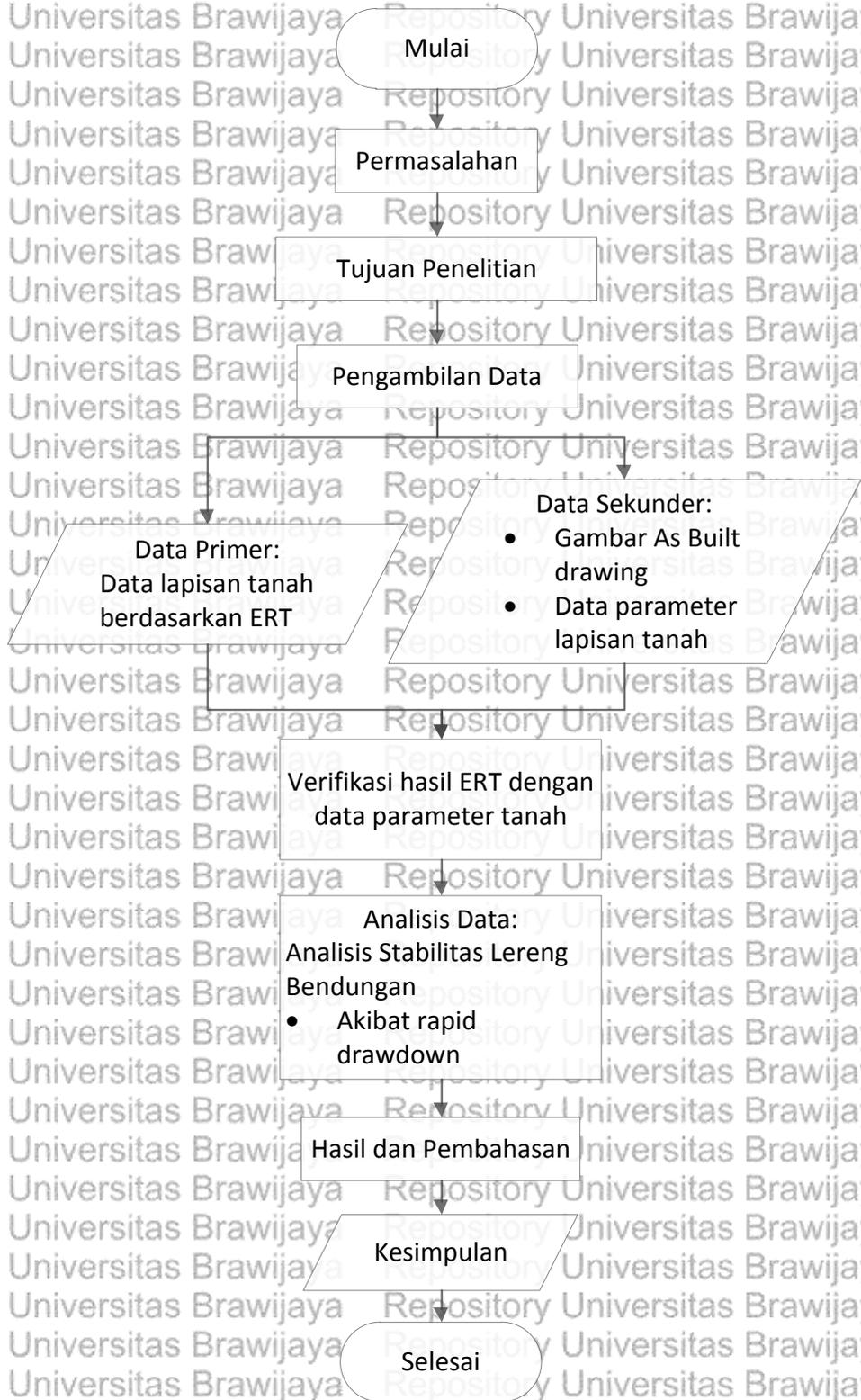
Gambar 2.9 GeoStudio Starting Icon





**BAB III
METODE PENELITIAN**

3.1. Diagram Alir Pelaksanaan Studi



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2. Lokasi dan Waktu Studi

Penelitian ini dilakukan dengan objek observasi Bendungan Selorejo selama 5 bulan dari Agustus sampai Desember 2014. Selanjutnya dilakukan uji laboratorium pada bulan Januari 2015.



Gambar 3.2 Lokasi Bendungan Selorejo

3.3. Metode Pengumpulan Data

3.3.1 Data Primer

Data primer adalah data yang diperoleh secara langsung baik melalui penyelidikan di lapangan maupun di laboratorium. Data primer yang akan diambil pada penelitian ini adalah data lapisan tanah yang didapatkan menggunakan Alat *Electrical Resistivity Tomography* (ERT). Data lain yang diambil adalah data tes laboratorium dari material tanah yang digunakan sebagai lapisan timbunan bendungan, untuk menentukan sifat fisik yang nantinya digunakan pada saat analisis stabilitas bendungan.

3.3.2 Data Sekunder

Data sekunder, data yang diperoleh melalui studi literatur sebagai pendukung dan pelengkap dari data-data primer. Data sekunder yang akan diambil pada penelitian ini adalah data gambar *as built drawing* untuk melihat bentuk lapisan tanah

dan mengetahui data parameter tanah yang digunakan di tiap lapisannya. Gambar ini didapatkan dari Perum Jasa Tirta sebagai pihak pengelola Bendungan Selorejo.

3.4. Metode Pengambilan Data

3.4.1. Data ERT

Mengambil data dengan menyusuri sepanjang tubuh bendungan menggunakan alat ERT. Di dapat data lapisan tanah untuk mengetahui lapisan tanah dan mengidentifikasi apabila ada kebocoran.

Data ERT diambil menggunakan konfigurasi wenner dengan as bendungan sebagai titik acuan dengan jarak interval 5 meter antar titik pemasangan elektroda sebanyak 90 buah pada lintasan sepanjang 180 meter

3.4.2. Data Tes Laboratorium

Tanah material bendungan yang diambil dari *quary site* dibawa ke laboratorium untuk melihat resistivitas, sudut geser, kohesi. Parameter ini dibutuhkan untuk menentukan sifat tanah berdasarkan nilai resistivitas yang didapatkan dari survey ERT, dan kemudian digunakan dalam analisis menggunakan SLOPE/W dan SLOPE/W.

a) Analisis Saringan

Sampel sedimen yang telah diambil dari lokasi penelitian selanjutnya akan diperiksa di laboratorium. Pemeriksaan/ analisis di laboratorium ini bertujuan untuk mendapatkan ukuran butiran material dan berat jenis material. Material disaring menggunakan saringan no 4, 10, 20, 40, 50, 80, 100 dan 200. Setelah didapatkan material dengan ukuran tersebut, material kemudian dicampur mengikuti distribusi *grain size* yang menyerupai gradasi material yang digunakan di lapangan.

b) ERT

Uji ERT ini untuk mengetahui hubungan kadar air (water content) terhadap resistivitas pada material tertentu. Material yang telah disusun sebelumnya dipisahkan dan diberi air dengan variasi kenaikan 5% sampai tanah tersebut tidak dapat menyerap air. Kemudian material yang sudah dicampur air dimasukkan ke dalam kotak berukuran 25x15x15 cm, kemudian dimasukkan tanah dengan kepadatan (γ_d) yang sesuai dengan nilai yang ada di *Completion Report on Selorejo Dam Project*, yaitu untuk *clay* sebesar 1,25,

tuff sand sebesar 1,603, *sand and gravel* 2,072, dan *fine sand and gravel* sebesar 1,772.

Setelah itu material yang sudah dimasukkan ke kotak tadi diukur resistivitasnya menggunakan resistivimeter dan kemudian dicatat besar resistivitas yang terbaca pada alat tersebut.

c) Direct Shear

Untuk mengetahui pengaruh kadar air terhadap nilai kohesi (c) dan sudut geser (ϕ).

3.5. Metode Analisis Data

3.5.1. Pengolahan data

Data lapisan tanah hasil geolistrik dijadikan acuan bentuk lapisan bawah tanah sekarang, dan parameter jenis tanah mengacu dari *as built drawing*. Data parameter tanah yang didapat dari gambar *as built drawing* kemudian dicocokkan dengan data geolistrik untuk mendapatkan kondisi bawah permukaan yang sebenarnya.

Dari survey ERT didapatkan interpretasi distribusi hambatan jenis dari lapisan tanah di bawah permukaan bendungan. Setelah mendapatkan bentuk profil dipilih potongan *cross section* bendungan yang memiliki bentuk lapisan tanah paling kritis.

3.5.2 Analisis Stabilitas Lereng Bendungan

Analisis struktur Bendungan Selorejo dilakukan menggunakan metode *Limit Equilibrium Method* (LEM) dengan bantuan software analisis struktur yakni Geo Studio 2007, adapun untuk bantuan pengolahan data digunakan program Microsoft Excel dan AutoCad 2010. Pada analisis bendungan dengan software Geo-Studio 2007 menggunakan beberapa fitur yang disediakan dalam paket analisis ini, yaitu SLOPE/W (untuk analisis stabilitas bendungan) dan SEEP/W (analisis garis rembesan air)

Analisis stabilitas pada lereng bendungan menggunakan program SLOPE/W & SEEP/W pada aplikasi GeoStudio 2007, menggunakan metode Fellenius & Bishop dengan kondisi:

1. Kondisi waduk kosong dengan elevasi +575. Kondisi ini disimulasikan karena merupakan kondisi setelah konstruksi saat keadaan tubuh bendungan belum terpengaruh gaya lain selain berat tubuh bendungannya sendiri.

2. Muka air *Intermediate* dengan elevasi +600. Disimulasikan untuk kebutuhan analisa bendungan dan waduknya dalam operasional jangka pendek.

3. Muka air normal dengan elevasi +622. Disimulasikan untuk kebutuhan analisa bendungan dan waduknya dalam operasional jangka panjang.

4. Muka air banjir dengan elevasi +622,60. Disimulasikan untuk kebutuhan analisa bendungan dan waduknya untuk estimasi kondisi kritis.

5. Muka air surut cepat (*Rapid Drawdown*) dengan skenario penurunan muka air dari +622 ke +575. Setiap skenario dibedakan oleh waktu penurunan muka air. Pemilihan variasi waktu penurunan mengacu pada terminologi *rapid*/cepat dimana penurunan dinyatakan sebagai *rapid drawdown* jika lajunya lebih besar dari 1 m/hari (Alonso dan Punyol, 2009). Variasi waktu penurunan muka air yang digunakan adalah 5, 10, 15, 20, dan 30 hari. Bila dari variasi waktu tersebut tidak ditemukan titik aman, maka dilakukan coba-coba sampai didapat waktu penurunan yang aman untuk kondisi *rapid drawdown*. Disimulasikan untuk kebutuhan analisa bendungan dan waduknya untuk estimasi kondisi hulu kritis

3.5.3 Data Bendungan

Data yang diambil dari *Completion Report on Selorejo Dam Project* berupa data geometri bendungan, parameter tanah, dan gambar *as buit drawing*. Untuk data geometri adalah:

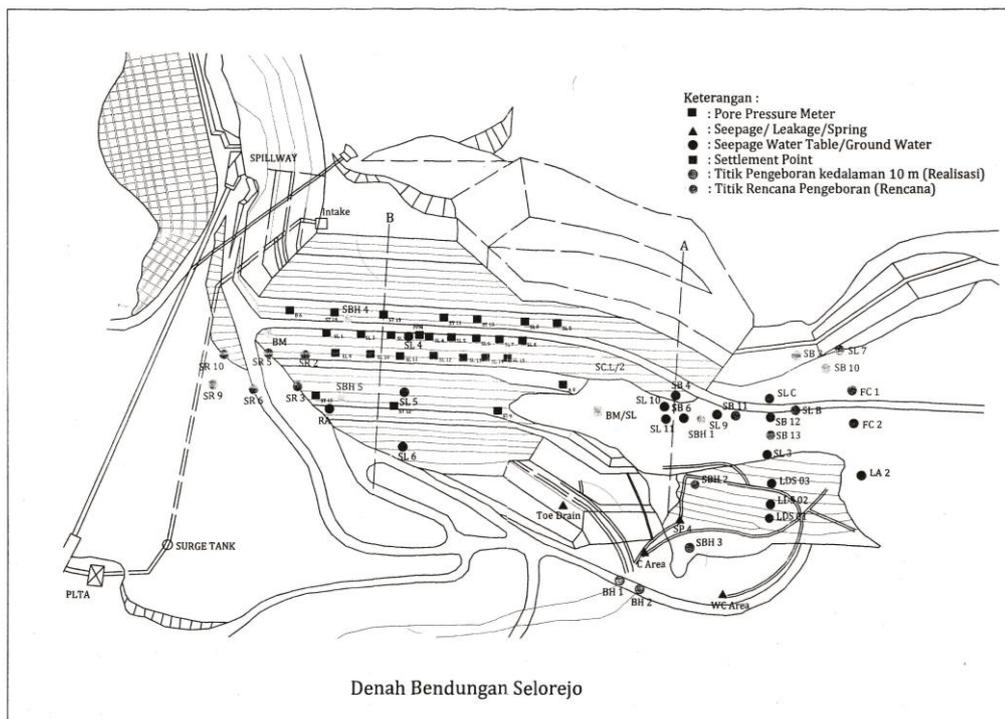
1. Tipe bendungan = Urugan
2. Tinggi Bendungan terh. dasar sungai (m) = 46,00
3. Tinggi bendungan terh. dasar galian (m) = 49,00
4. Elevasi Puncak Bendungan (m) = +625,00
5. Elevasi Muka Air Banjir (HWL) (m) = +622,60
6. Elevasi Muka Air Normal (NWL) (m) = +622,00
7. Elevasi Muka Air Rendah (LWL) (m) = +598,00
8. Panjang puncak (m) = 447,10
9. Lebar puncak (m) = 8,00

Adapun data material sekunder yang digunakan:

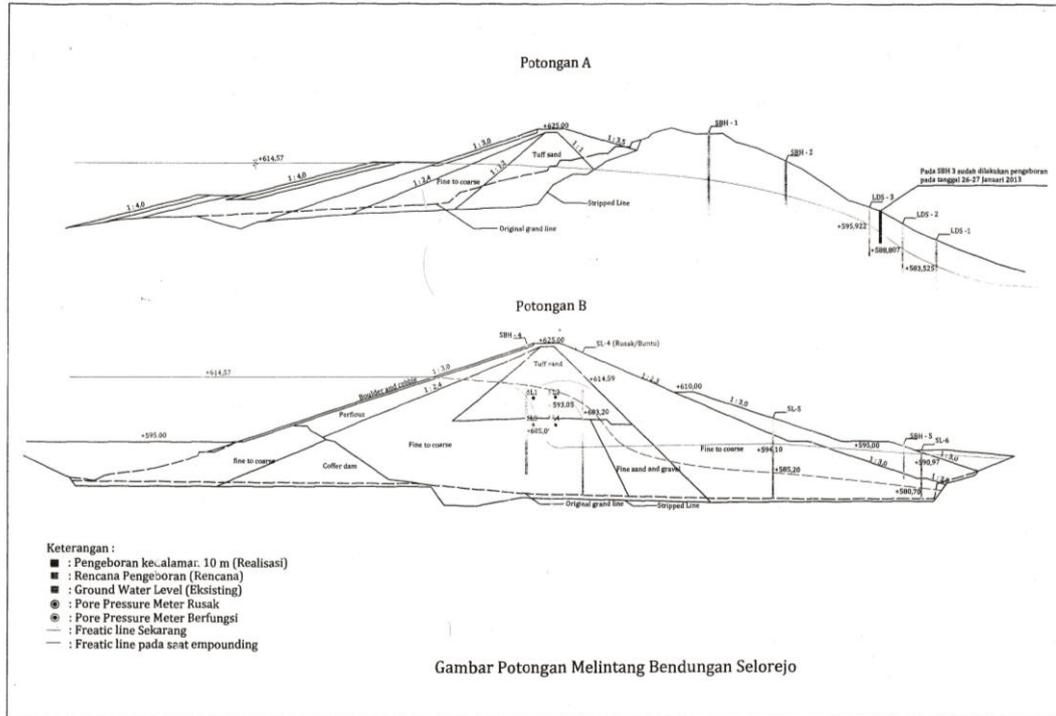
Tabel 3.1 Data Material Lapisan Tanah Bendungan Selorejo

Data Tanah	Bendungan				Counterweight
	Clay Loam	Tuff sand	Sand and Gravel (Coarse)	Fine sand & gravel	
Jenis Material					Clayey Loam
Berat Volume γ (t/m ³)	1,250	1,603	2,072	1,772	1,136
Kohesi (t/m ²)	6,16	3,05	-	-	6,77
Sudut Geser ϕ (°)	20°46'	41°30'	-	-	17°28'
Permeabilitas K (cm/dtk)	$3,9 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-5}$	$0,95 \times 10^{-4}$	$1,933 \times 10^{-6}$	-

Sumber: (Kementerian Pekerjaan Umum, 1976)

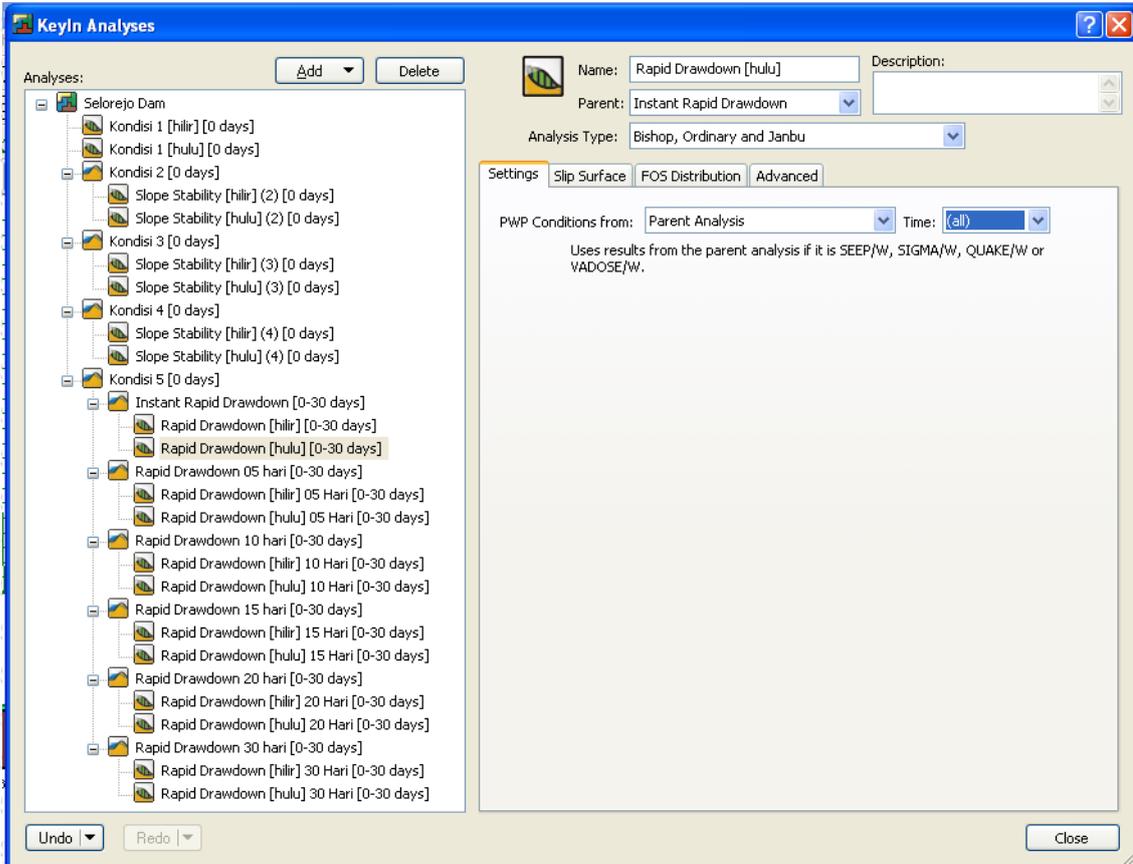


Gambar 3.3 Denah Bendungan Selorejo



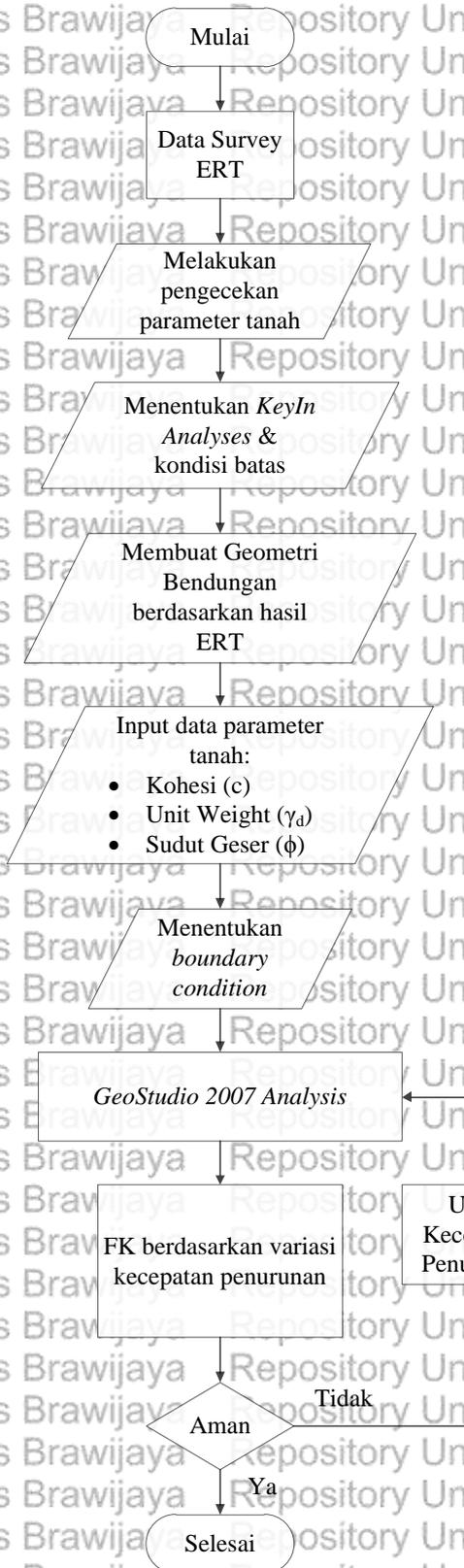
Gambar Potongan Melintang Bendungan Selorejo

Gambar 3.4 Potongan melintang Bendungan Selorejo



Gambar 3.5 KeyIn Analyses pada program Geostudio 2007

3.6. Diagram Alir Analisis Data



Gambar 3.6 Diagram alir pengolahan data



BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1. Umum

Bendungan Selorejo adalah bendungan yang sudah cukup berumur dan perlu dianalisis bagaimana kondisinya pada saat ini terhadap kegagalan bendungan (*failure*), khususnya terhadap *rapid drawdown* yang cukup berbahaya bagi bendungan. Untuk menganalisis kekuatannya saat ini, dibutuhkan kondisi bawah permukaan dari bendungan. Salah satu alternatif untuk mengetahui kondisi tubuh bendungan tanpa merusak adalah dengan metode *Electrical Resistivity Tomography* (ERT). Berdasarkan hasil data tersebut, maka dapat dianalisis evaluasi perilaku bendungan dan nilai keamanan terhadap kondisi penurunan muka air cepat (*rapid drawdown*)

Adapun data yang digunakan dalam analisis ini adalah data primer dan sekunder, data-data tersebut berupa:

1. Gambar *as built drawing*

Gambar *as built drawing* yang digunakan sebagai dasar pemodelan dalam analisis menggunakan software Geostudio 2007 merupakan gambar dari *Completion Report on Selorejo Dam Project* yang dibuat oleh Kementerian Pekerjaan Umum Republik Indonesia tahun 1976.

2. Data survey ERT

Data survey ERT didapatkan dari pengambilan data langsung pada tubuh bendungan menggunakan metode wenner

3. Data hasil pengujian material di laboratorium

Data hasil pengujian di laboratorium untuk mengetahui berapa nilai *dry density*, kohesi dan sudut geser dari material yang digunakan pada timbunan bendungan. Pengujian juga dilakukan untuk mengetahui hubungan antara nilai resistivitas dengan kadar air, kohesi dan sudut geser dari material tersebut.

4.2. Hasil Investigasi Geolistrik

Survey pengambilan data geolistrik tubuh bendungan dilakukan dengan dua arah garis, yaitu arah sejajar dan arah tegak lurus garis as bendungan. Pengambilan yang dilakukan arah sejajar as bendungan ditunjukkan sebagai garis II sampai 5, dilakukan untuk memperkirakan lokasi titik bendungan yang paling lemah, yang nantinya akan dianalisis kestabilan lerengnya. Untuk mendapatkan profil nilai resistivitas tanah bawah

permukaannya, dilakukan menggunakan metode wenner array yang dirangkai di sepanjang garis profil 1, 2, 3, 4, dan 5 dengan 36 titik elektroda dengan jarak 5 m. Total panjang pada tiap profil memanjang 1, 2, 3, 4, dan 5 ini adalah 180 m

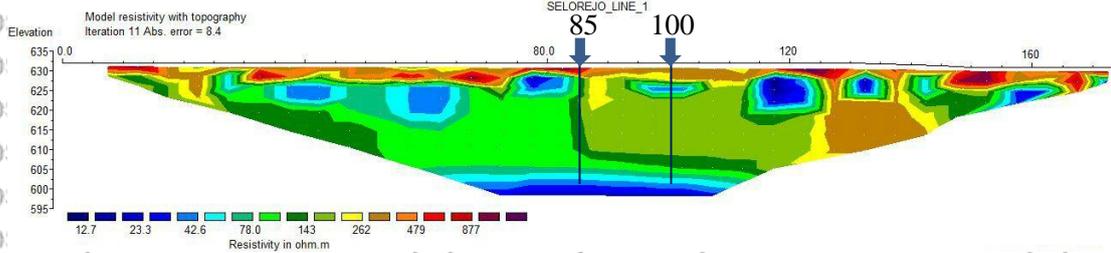
Sedangkan pengambilan arah tegak lurus garis as bendungan ditunjukkan sebagai garis A dan B, dilakukan untuk mengetahui kondisi potongan melintang dari bendungan tersebut. Pengambilan data survey juga menggunakan metode wenner array, yang dirangkai disepanjang garis profil A dan B dengan 20 titik elektroda dengan jarak 5 m. Total panjang dari profil A dan B adalah 95 m. Gambar 4.1 menunjukkan lokasi garis yang digunakan pada studi ini.

Pengambilan data ERT garis memanjang 1 sampai 5 sekitar bulan Juli-Agustus 2014, untuk pengambilan data ERT garis melintang A dan B pada bulan desember 2014.

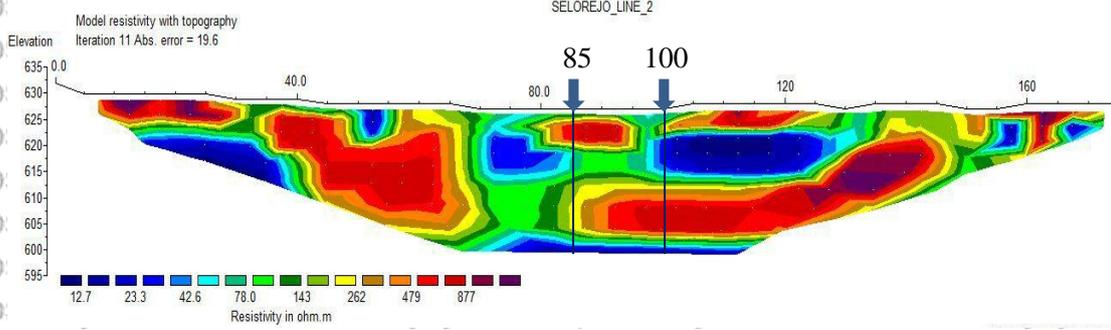


Gambar 4.1 Lokasi profil ERT pada tubuh bendungan

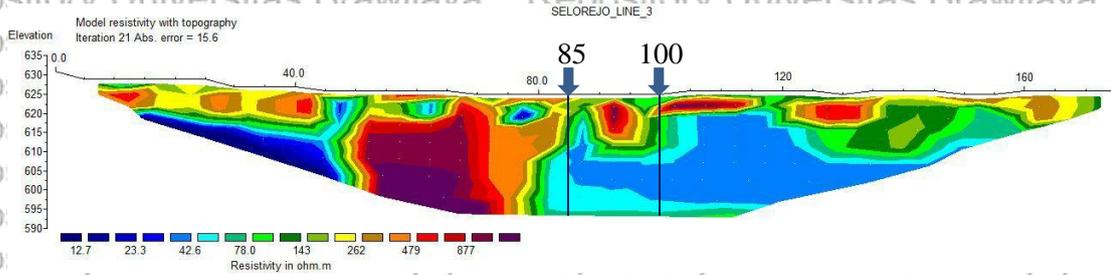
Dari survey geolistrik yang sudah dilakukan, didapatkan hasil interpretasi distribusi resistivitas material yang ada di bawah permukaan. Gambar 4.2 menunjukkan hasil visual dari survey ERT yang menunjukkan variasi resistivitas yang signifikan pada lokasi yang berbeda di profil tersebut. Rentang resistivitas 0-1000 Ω m pada tanah, mengindikasikan adanya variasi tipe tanah, kandungan lempung, porositas, dan kadar air. Zona lokal dengan resistivitas rendah (3-200) Ω m dapat diidentifikasi sebagai kemungkinan adanya kandungan air yang tinggi yang mengisis pori-pori tanah, dikarenakan rembesan dari air tampungan bendungan masuk ke dalam celah tanah.



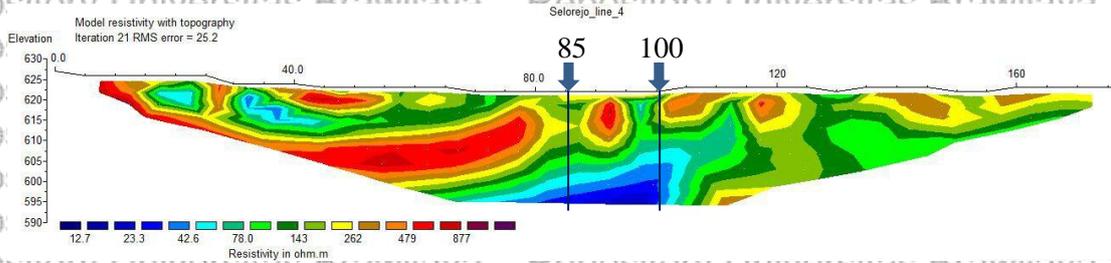
(a) Profil Line 1



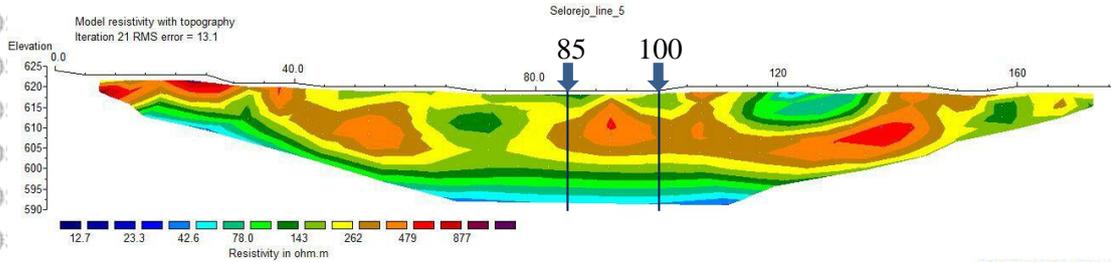
(b) Profil Line 2



(c) Profil Line 3



(d) Profil Line 4



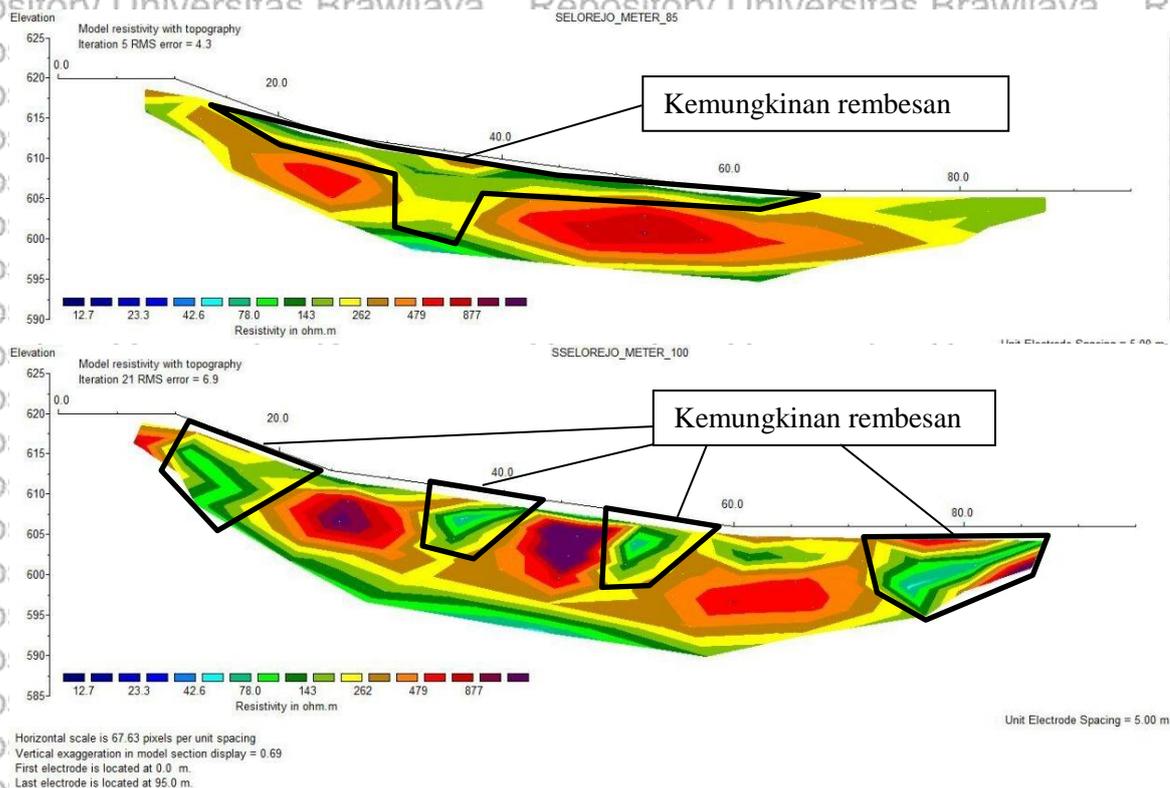
(e) Profil Line 5

Horizontal scale is 35.69 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.68
First electrode is located at 0.0 m.
Last electrode is located at 180.0 m.

Unit Electrode Spacing = 5.00 m.

Gambar 4.2 Interpretasi survey ERT profil memanjang

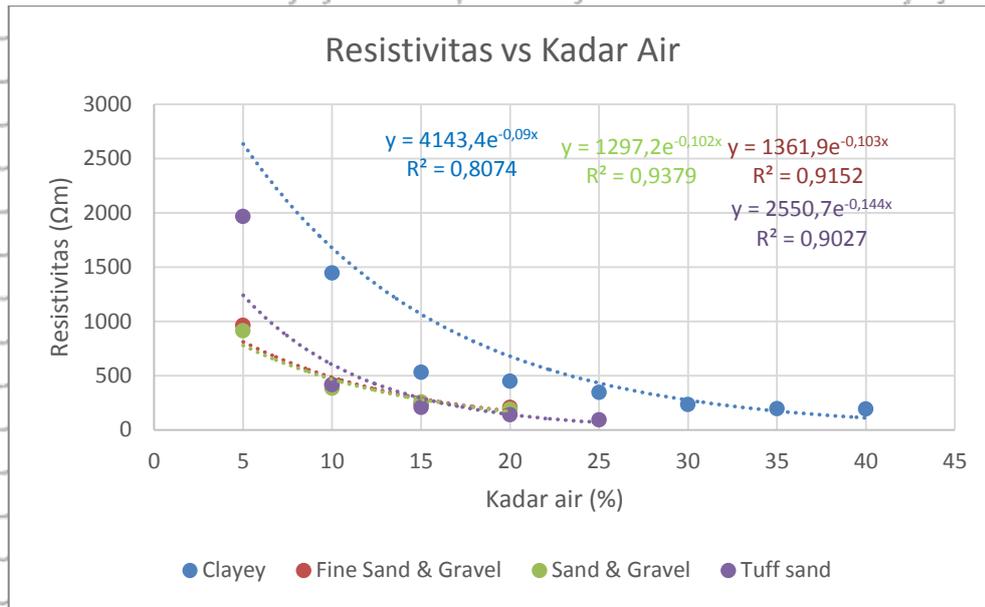
Zona resistivitas rendah pada garis memanjang terlihat diantara jarak 60-110 m dan pada kedalaman 600-590 dan 620-610 m. Zona ini juga terlihat konsisten di semua profil. Ini mengindikasikan kemungkinan terjadinya retakan transversal di area tersebut. Selanjutnya dilakukan survey ERT pada titik 85 dan 100 untuk mendapatkan profil melintang yang kemungkinan memiliki profil paling kritis. Hasil dari survey profil melintang ini ditampilkan pada Gambar 4.3



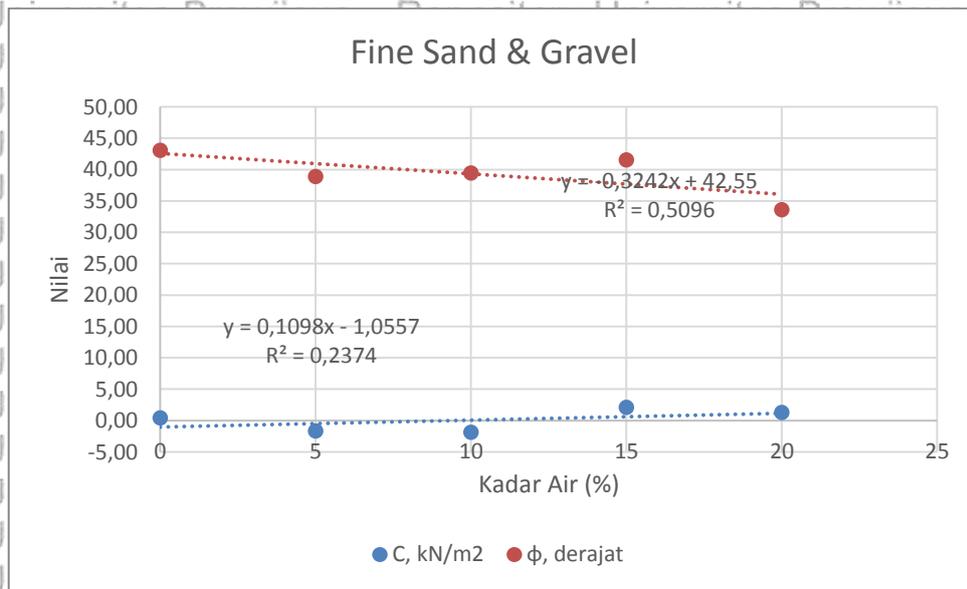
Gambar 4.3 Interpretasi hasil survey ERT profil melintang A dan B

4.3. Hasil Pengujian Material

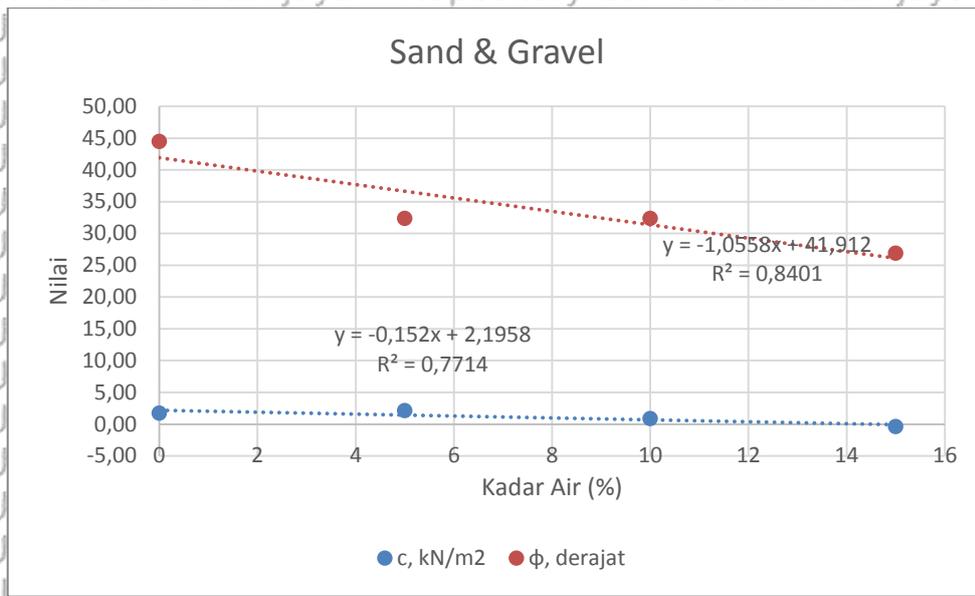
Sampel tanah yang diambil dari *quary* bendungan digunakan untuk mengetahui klasifikasi dan hubungan antara resistivitas dengan nilai kadar air, sudut geser dan kohesi yang nantinya digunakan pada saat analisis stabilitas bendungan. Hasil dari uji laboratorium ditampilkan pada gambar 4.4 sampai 4.8



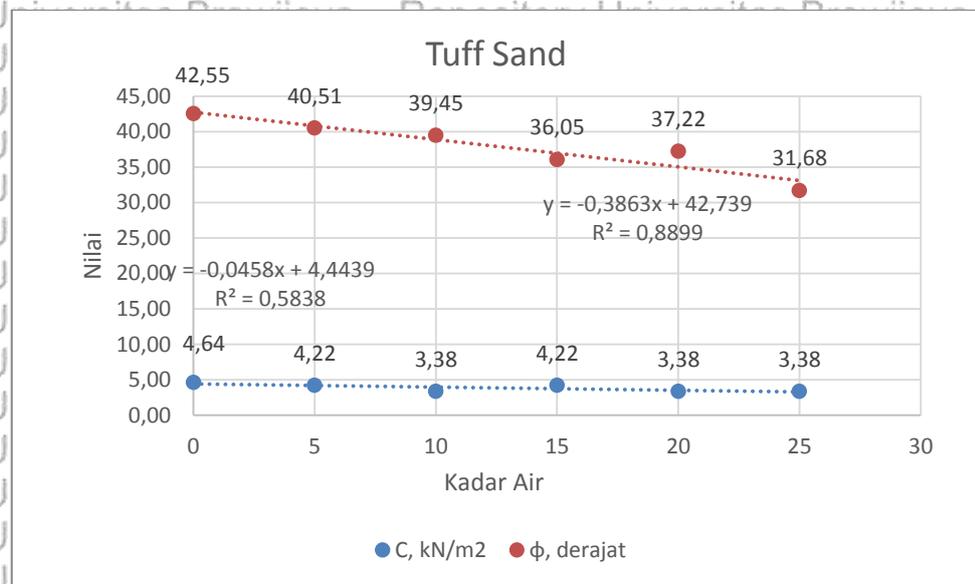
Gambar 4.4 Grafik hubungan nilai resistivitas terhadap kadar air



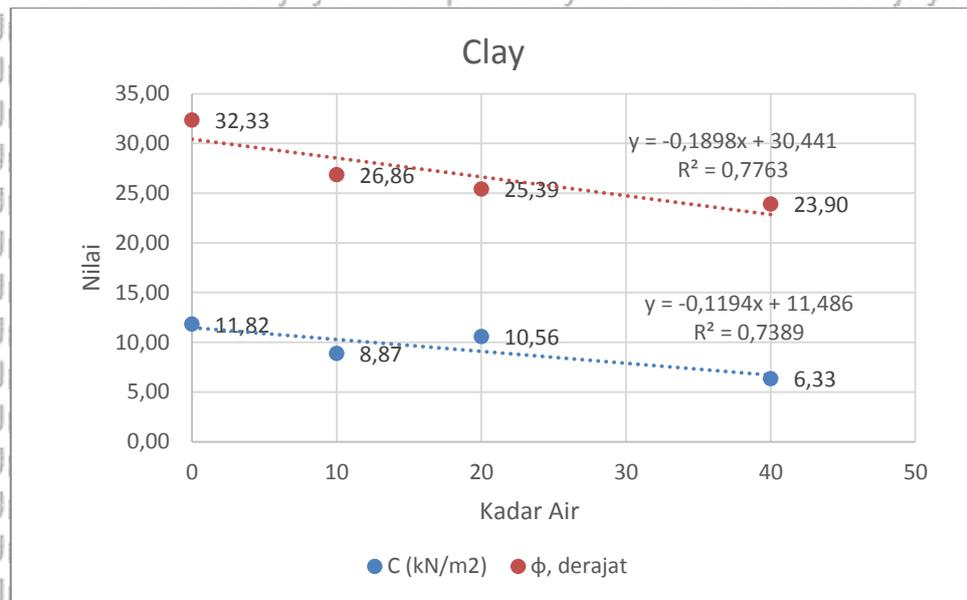
Gambar 4.5 Grafik hubungan kadar air terhadap phi (φ) dan kohesi pada *Fine Sand & Gravel*



Gambar 4.6 Grafik hubungan kadar air terhadap phi (φ) dan kohesi pada *Sand & Gravel*



Gambar 4.7 Grafik hubungan kadar air terhadap phi (φ) dan kohesi pada *tuff sand*



Gambar 4.8 Grafik hubungan kadar air terhadap phi (ϕ) dan kohesi pada *clay*

Dari Gambar 4.4 dapat di ketahui bahwa perbedaan nilai resistivitas dipengaruhi oleh perbedaan kadar air yang ada pada material. Semakin rendahnya nilai resistivitas suatu material mengindikasikan semakin besar kadar air yang terkandung pada material tersebut. Air yang ada pada material menjadi konduktor listrik sehingga nilai resistivitas/hambatan semakin menurun. Besarnya kadar air dapat disebabkan karena terjadinya rembesan air yang masuk kedalam celah yang ada di dalam tubuh bendungan.

Sebelumnya sudah dibahas mengenai kemungkinan terjadinya rembesan yang diindikasikan oleh perbedaan resistivitas. Zona dengan nilai resistivitas lemah berada sekitar nilai 202,5 Ω m, kemudian dihubungkan dengan grafik untuk didapatkan nilai kohesi dan sudut geser pada zona tersebut.

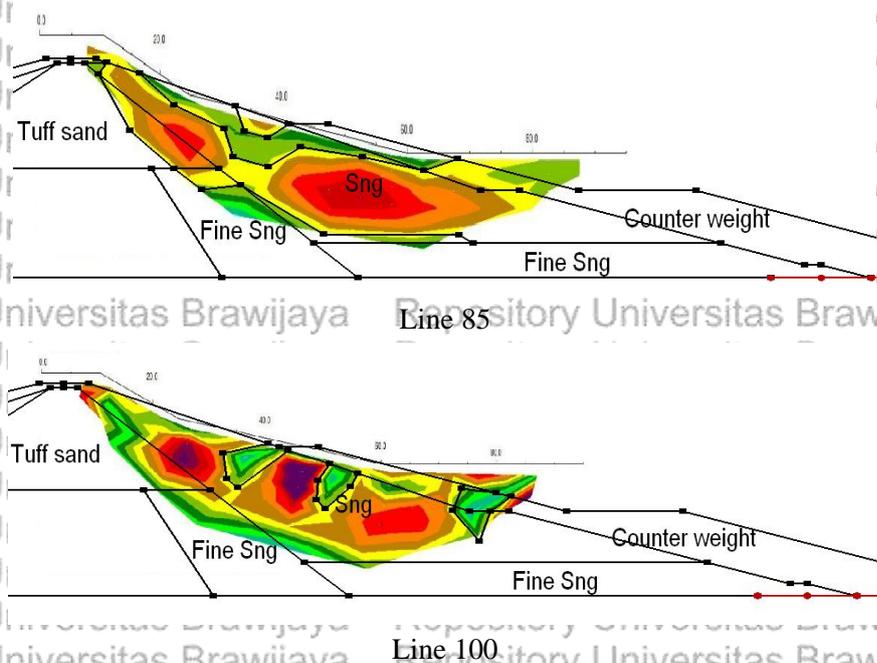
Tabel 4.1 Data spesifik material Bendungan Selorejo daerah lemah

Material	Dry Density (γ_d)	Kadar Air (%)	Kohesi (c)	Sudut Geser (ϕ)
<i>Clay</i>	1,25	33,53	7,480	24,077
<i>Sand & Gravel</i>	2,072	18,208	-	22,687
<i>Tuff Sand</i>	1,603	17,59	3,637	35,943
<i>Fine Sand & Gravel</i>	1,772	18,5	-	36,552

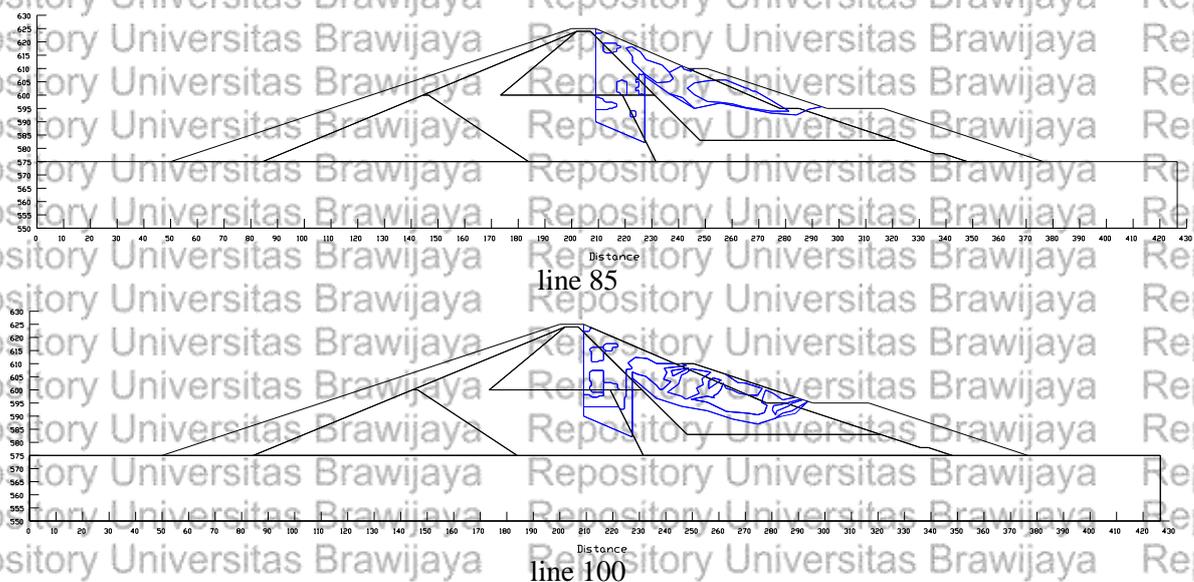
Sumber: Hasil Penelitian

4.4. Soil Layering

Hasil dari survey ERT yang sebelumnya sudah dibahas digunakan untuk mengetahui kemungkinan terjadinya retakan pada tubuh bendungan. Pertama-tama tubuh bendungan dibuat sesuai dengan gambar *as buit drawing* yang telah didapatkan sebelumnya. Tubuh bendungan kemudian dibuat model berdasarkan interpretasi dari hasil survey ERT.



Gambar 4.9 Pembuatan Layer Lapisan Bendungan Berdasarkan Hasil ERT



Gambar 4.10 Plotting Hasil ERT ke Program Geostudio

4.5. Analisis Kestabilan Lereng Bendungan Selorejo

Simulasi untuk mengetahui kestabilan Bendungan Selorejo menggunakan dua kali simulasi, yaitu dengan simulasi menggunakan program Geostudio dengan metode Bishop dan *ordinary* (Fellenius). Dua simulasi tersebut menggunakan data parameter tanah dan gambar dari Bendungan Selorejo

Pada simulasi perhitungan stabilitas Bendungan Selorejo ini menggunakan beberapa kondisi yang berbeda karena berbagai kondisi perubahan timbunan dan zona rembesan berpengaruh langsung pada stabilitas bendungan. Adapun kondisi yang diasumsikan mengacu pada standar perhitungan stabilitas menggunakan “Pedoman analisis stabilitas bendungan urugan”

Tabel 4.2 Kondisi simulasi stabilitas Bendungan Selorejo

Kondisi	Elevasi	Keterangan
Waduk Kosong	+595 m	Kondisi setelah konstruksi
Muka Air <i>Intermediate</i>	+610 m	Untuk analisis jangka pendek
Muka Air Normal	+622 m	Untuk operasional jangka panjang
Muka Air Banjir	+622,6 m	Estimasi kondisi kritis
Muka Air Surut Cepat (<i>Rapid Drawdown</i>)	+622 m ke +575 m	Estimasi Hulu kritis

4.5.1 Input Data simulasi

Simulasi yang dilakukan dengan software Geostudio 2007 seperti yang disebutkan sebelumnya akan menggunakan data gambar shop drawing, data parameter tanah. Adapun rincian penggunaannya adalah sebagai berikut:

1. Gambar *As Built Drawing*

Dari gambar *as built drawing* akan didapatkan data-data yang akan digunakan dalam simulasi berupa:

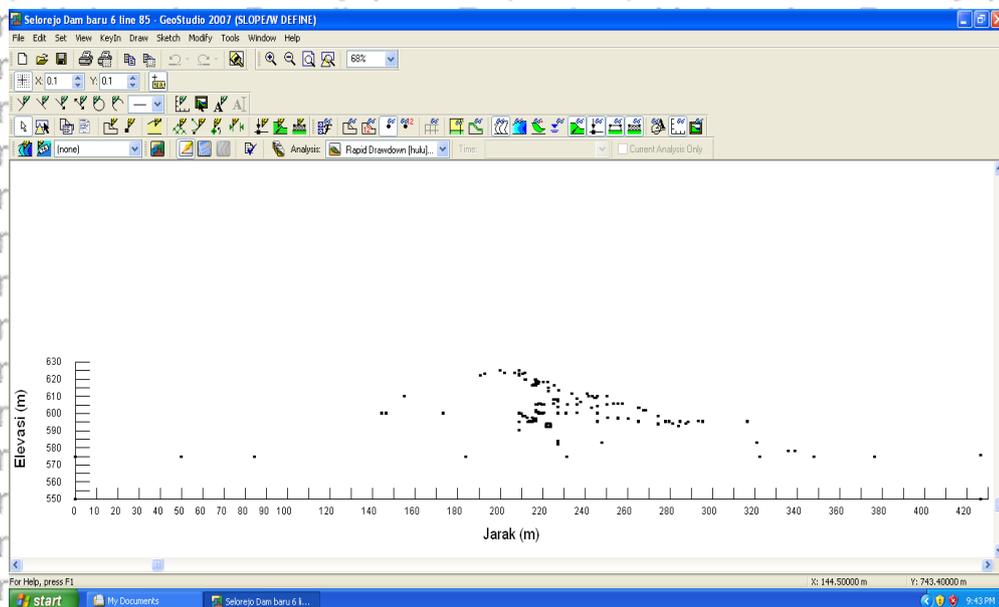
- a) Gambar *as built drawing* menampilkan zona timbunan dan material yang digunakan pada tiap timbunan di Bendungan Selorejo, yang digunakan untuk menentukan zona timbunan pada simulasi Bendungan Selorejo
- b) Data spesifik ukuran Bendungan Selorejo seperti tinggi, lebar dan luas bendungan yang digunakan dalam penggambaran saat simulasi (dapat berupa koordinat maupun satuan panjang)

c). Data kondisi yang akan digunakan saat simulasi, seperti tinggi muka air saat penuh, *intermediate*, banjir ataupun saat muka air surut cepat

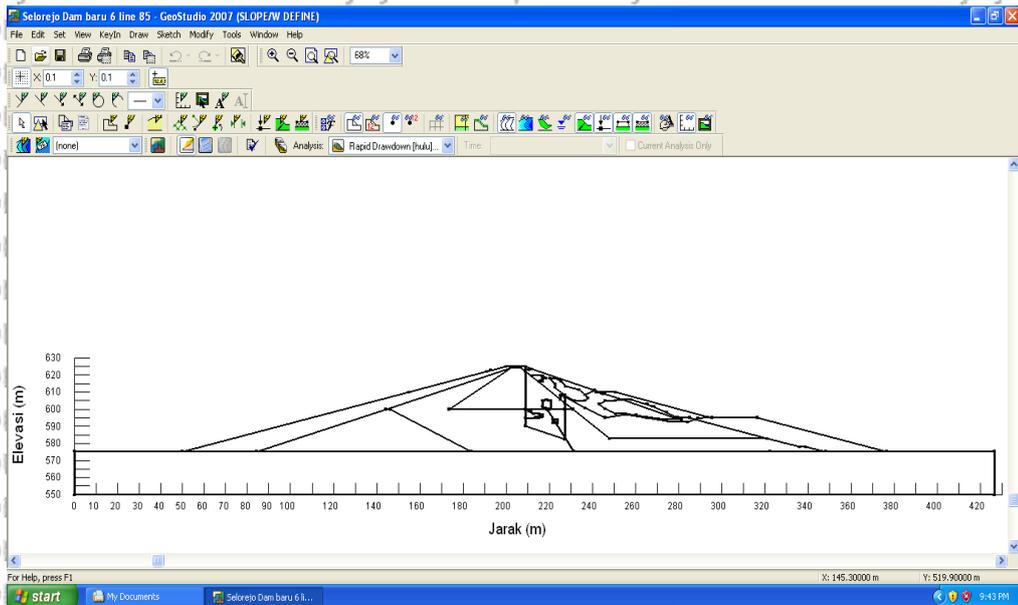
2. Data spesifik material bendungan yang didapat dari pengujian sebelumnya di laboratorium, berupa berat kering (γ_d), kohesi (c) dan sudut geser (ϕ).

4.5.2 Input Data pada Simulasi Program Geostudio 2007

1. Memasukkan titik koordinat potongan Bendungan Selorejo yang didapatkan dari gambar *as built drawing* dan Bendungan Selorejo. Koordinat ini akan mewakili satuan panjang pada tubuh bendungan. Koordinat ini kemudian saling dihubungkan untuk membentuk *region* yang akan menjadi bidang-bidang dari material yang akan digunakan.



Gambar 4.11 Input Koordinat Bendungan Selorejo pada Program Geostudio



Gambar 4.12 Koordinat yang Telah Dihubungkan Menjadi *Region*

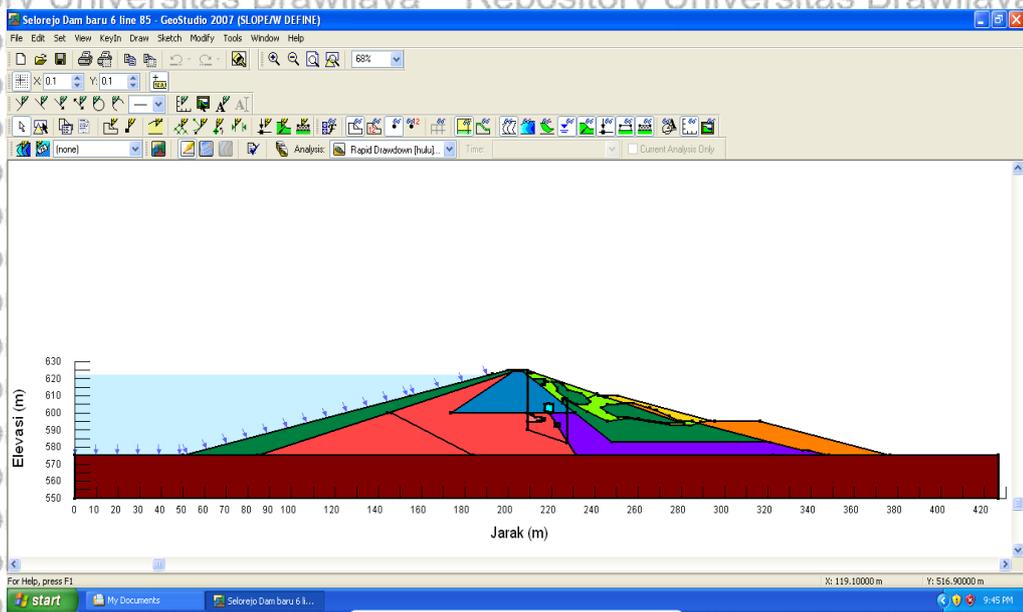
- Memasukkan data material tanah pada zona material sesuai dengan data yang ditampilkan pada Tabel 4.1

Material	Dry Density (γ_d)	Kadar Air (%)	Kohesi (c)	Sudut Geser (ϕ)
Clay	1,25	33,53	7,480	24,077
Sand & Gravel	2,072	18,208	-	22,687
Tuff Sand	1,603	17,59	3,637	35,943
Fine Sand & Gravel	1,772	18,5	-	36,552

Gambar 4.13 Input Data Material Bendungan pada Program Geostudio

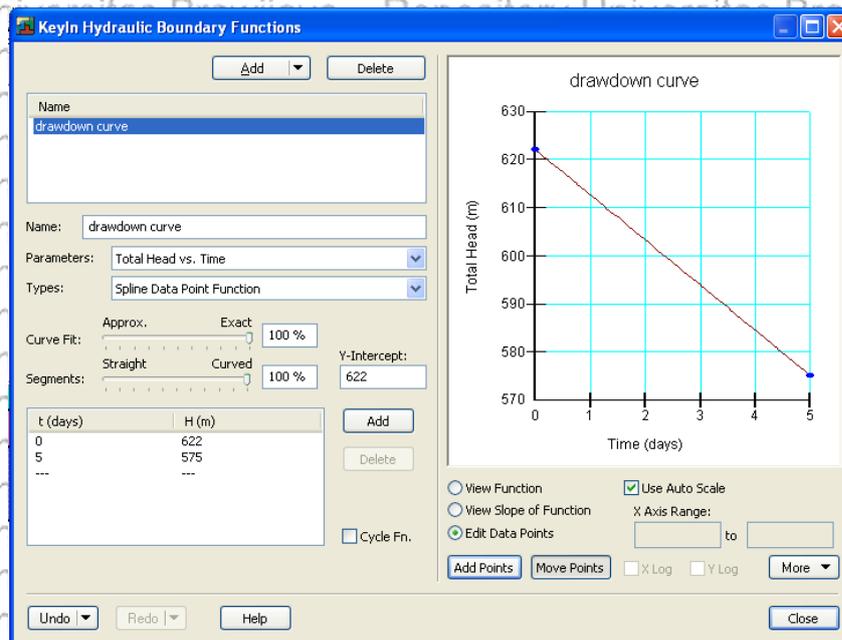
- Memasukkan tekanan air pori/*Pore water pressure* sesuai dengan kondisi simulasi pada Tabel 4.2 menurut elevasi muka airnya. Stabilitas sangatlah dipengaruhi oleh perhitungan tekanan air pori yang akan menyebabkan rembesan pada tubuh bendungan. Dan rembesan tersebut dapat pula membawa butiran-butiran material pada tubuh bendungan, sehingga tekanan

air pori juga mempengaruhi kekuatan tanah dan kekuatan geser tanah. Hal ini memuat tekanan air pori memegang peranan penting dalam perhitungan stabilitas bendungan untuk mencari nilai faktor keamanan.



Gambar 4.14 Input Tekanan Air Pori Pada Tubuh Bendungan

- Untuk simulasi kondisi muka air surut cepat (*rapid drawdown*), muka air ditentukan dari muka air awal (sebelum penurunan) ke muka air akhir (setelah penurunan). Selain itu, dimasukkan juga kecepatan penurunan muka air untuk mencari waktu penurunan kritis dari *rapid drawdown* tersebut.

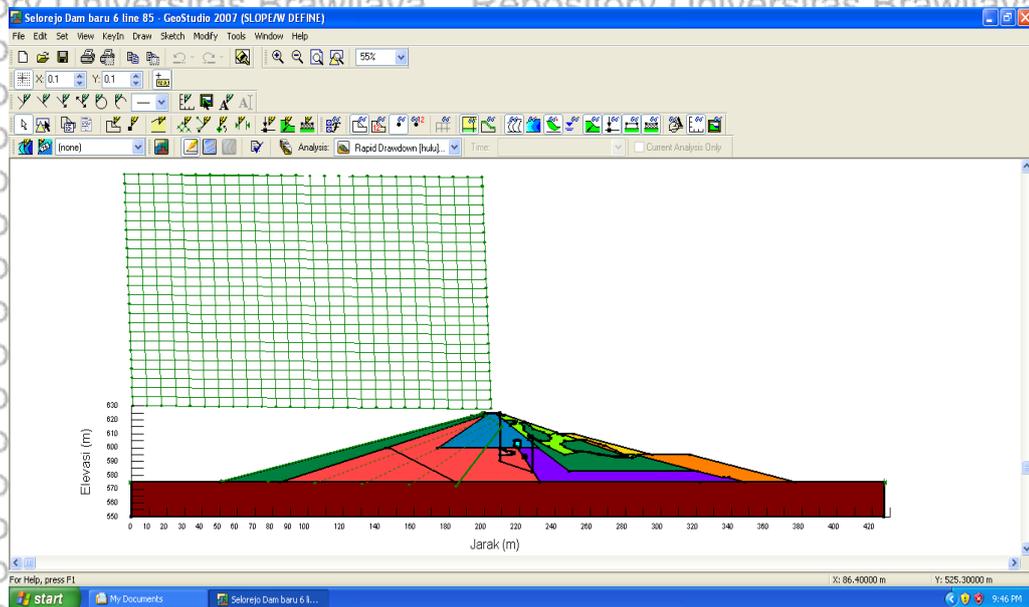


Gambar 4.15 Input Kondisi *Rapid Drawdown* pada Program Geostudio

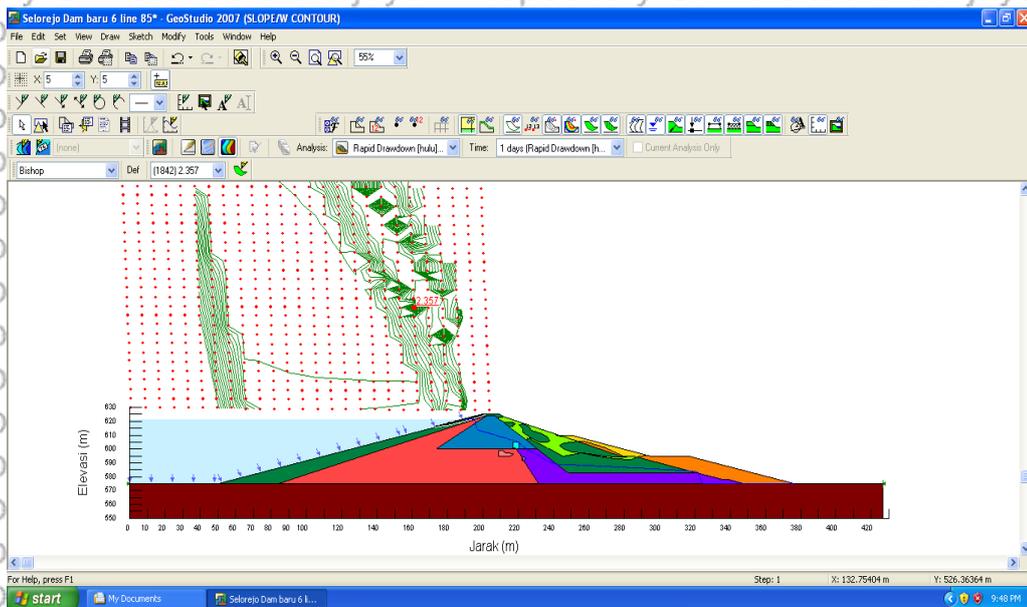
4.5.3 Proses pada simulasi program Geostudio 2007

Pada proses simulasi di program ini menggunakan metode *Limit Equilibrium Method* (LEM) yang menggunakan asumsi dua bidang kelongsoran

1. Proses menentukan titik pusat dari lingkaran yang akan menjadi bidang gelincir atau bidang longsor yang ada pada tubuh bendungan. Dalam tahap ini dipilih metode grid dan radius karena dengan metode ini dapat memudahkan titik pusat paling kritis dengan asumsi titik percobaan yang sangat banyak. *Grid* adalah jaring-jaring yang akan ditempatkan titik-titik asumsi pusat lingkaran, sedangkan *radius* adalah jarak terjauh dari diameter lingkaran yang akan dicoba dalam perhitungan. Dengan metode ini dapat ditentukan titik diameter yang tidak melebihi tubuh bendungan diatas tumpuan bendungan atau *bedrock*. Syarat bidang kelongsoran yang baik adalah tidak melebihi tubuh bendungan. Untuk mendapatkan titik yang paling kritis dilakukan trial berkali-kali sampai didapatkan titik dengan nilai faktor keamanan yang terkecil berada di dalam kontur, yang menunjukkan tidak ada lagi titik pusat dengan faktor keamanan yang lebih kecil.

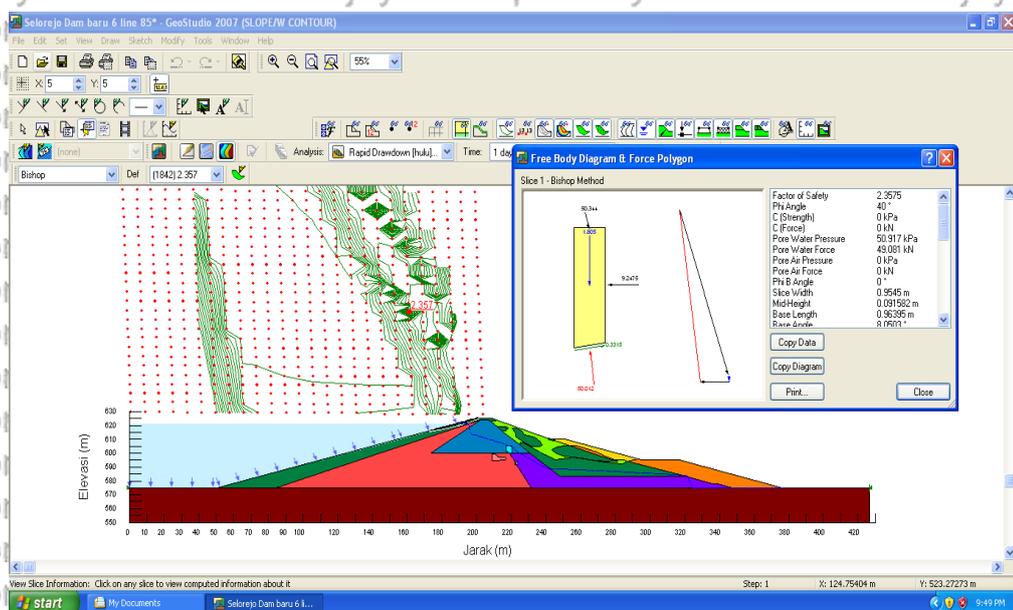


Gambar 4.16 Proses Peletakan *Grid* dan *Radius*



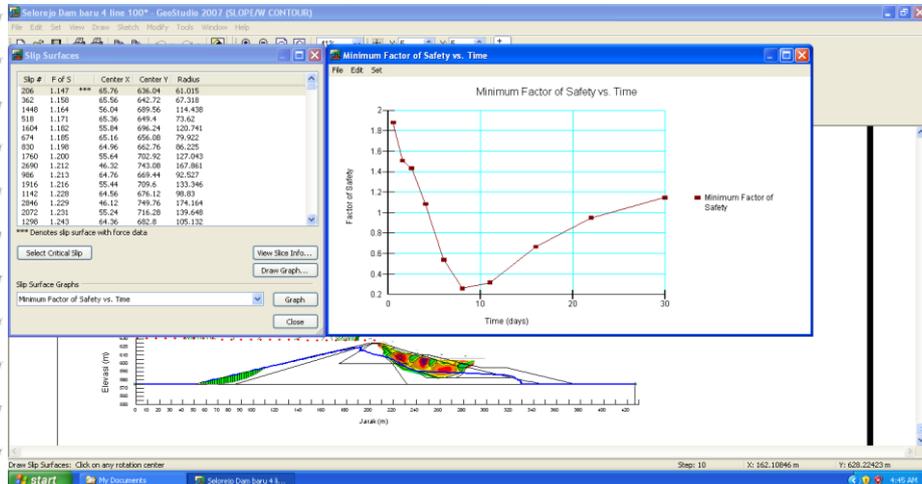
Gambar 4.17 Proses Pencarian Titik Kritis dengan Kontur

- Proses selanjutnya melakukan analisis terhadap setiap potongan irisan pada seluruh bidang longsor. Seperti terlihat pada Gambar 4.18 perhitungan analisis dilakukan pada setiap irisan untuk mencari faktor keamanan yang paling kritis dari tubuh bendungan tersebut. Lalu dapat dipilih juga bidang gelincir lain yang memenuhi kondisi teoritis, karena terkadang bidang luncur kritis yang ditampilkan melebihi tubuh bendungan dan kurang relevan dengan teori yang ada.



Gambar 4.18 Proses Akhir Pemilihan Faktor Keamanan

3. Pada kondisi *rapid drawdown*, dilihat hubungan antara faktor keamanan dengan waktu untuk melihat kondisi paling kritis selama penurunan muka air. Hubungan ini ditunjukkan dalam grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.19



Gambar 4.19 Analisis kondisi *rapid drawdown*

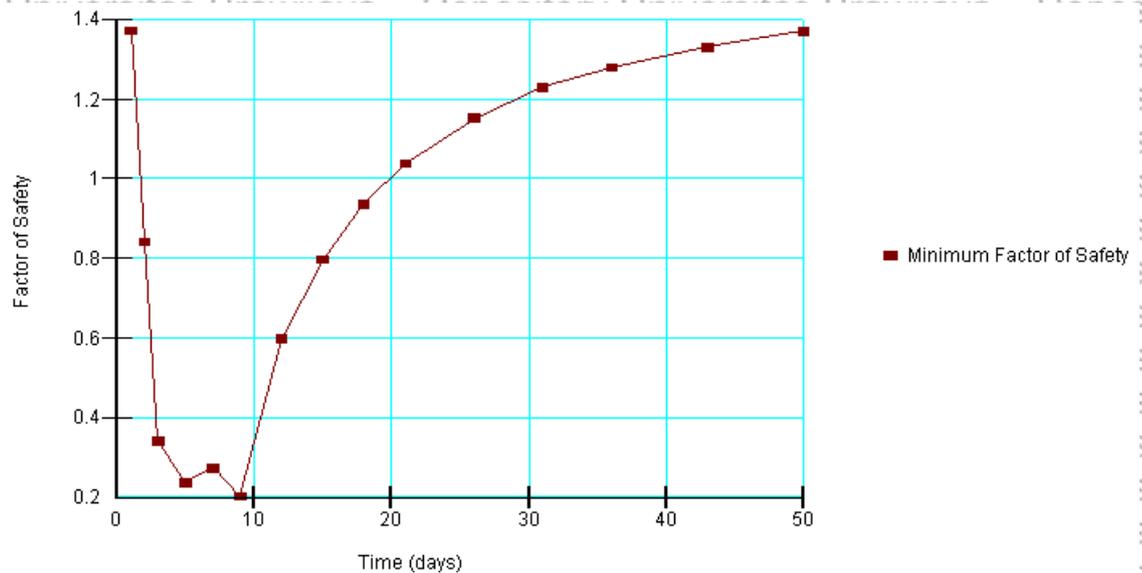
4.5.4 Analisa Hasil Simulasi Stabilitas *Line 85*

Dengan menggunakan data Bendungan Selorejo dan lapisan tanah berdasarkan ERT di lokasi, hasil dari simulasi program Geostudio adalah sebagai berikut:

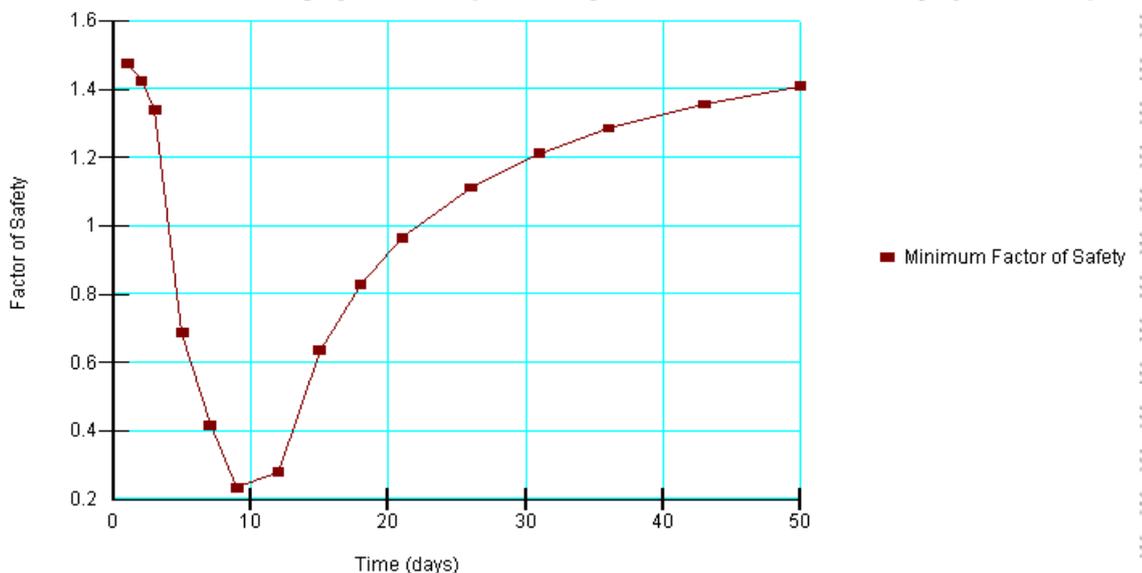
Tabel 4.3 Rekapitulasi Faktor Keamanan Kondisi 1-4 *line 85* dengan Simulasi Geostudio

No	Kondisi	Metode	
		Ordinary (Fellenius)	Bishop
1	Kondisi 1 (Waduk kosong, +595)		
	- Hulu	2,355	2,431
	- Hilir	0,962	0,964
2	Kondisi 2 (+610)		
	- Hulu	2,363	2,439
	- Hilir	0,962	0,963
3	Kondisi 3 (+622)		
	- Hulu	2,494	2,407
	- Hilir	0,962	0,963
4	Kondisi 4 (+622,6)		
	- Hulu	2,200	2,506
	- Hilir	0,962	0,963

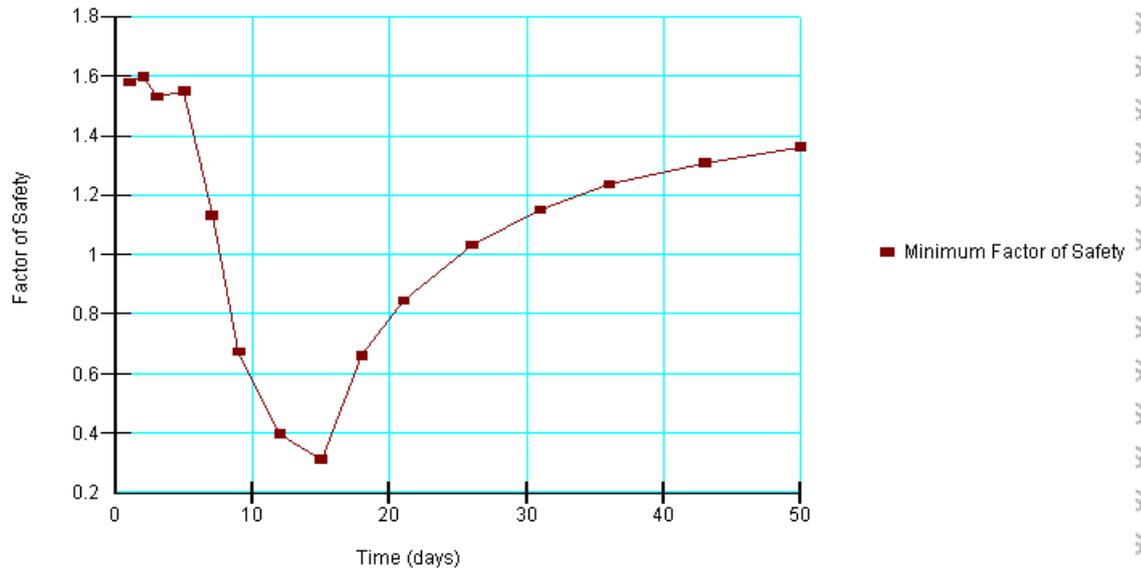
Pada kondisi ini bendungan berada dalam kondisi tidak aman, karena faktor keamanan bendungan terkecil adalah sebesar 0,932 pada bagian hilir bendungan. Untuk faktor keamanan akibat *rapid drawdown* dianalisis dengan variasi kecepatan penurunan 5, 10, 15, 20, dan 30 hari. Hasil dari simulasi menggunakan program Geostudio ditampilkan pada Gambar 4.20 sampai Gambar 4.24.



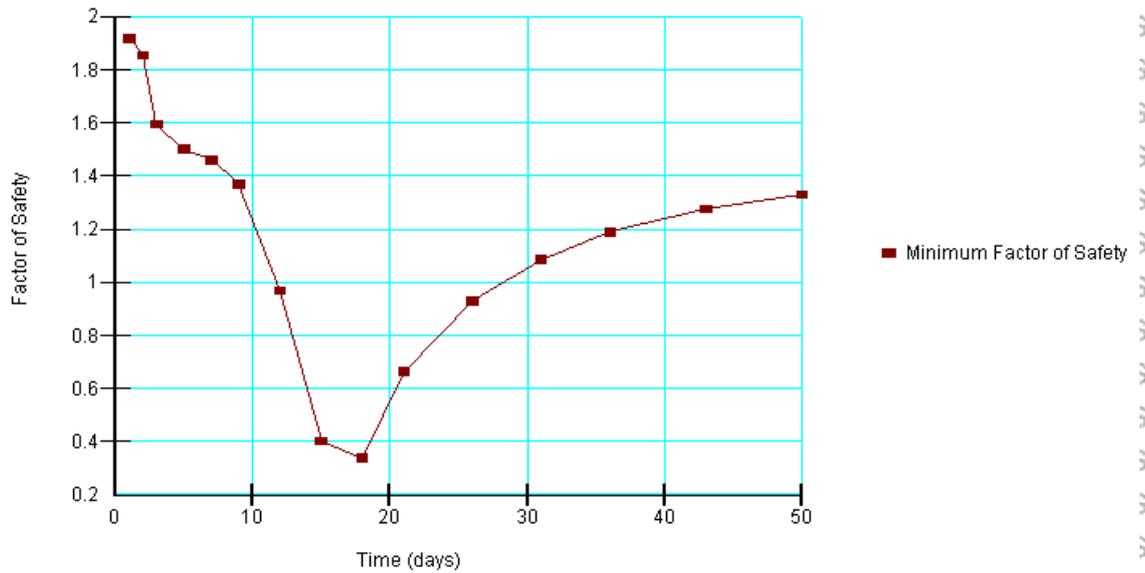
Gambar 4.20 Grafik faktor keamanan terhadap waktu pada line 85 dengan kecepatan penurunan 5 hari



Gambar 4.21 Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 85 dengan Kecepatan Penurunan 10 Hari

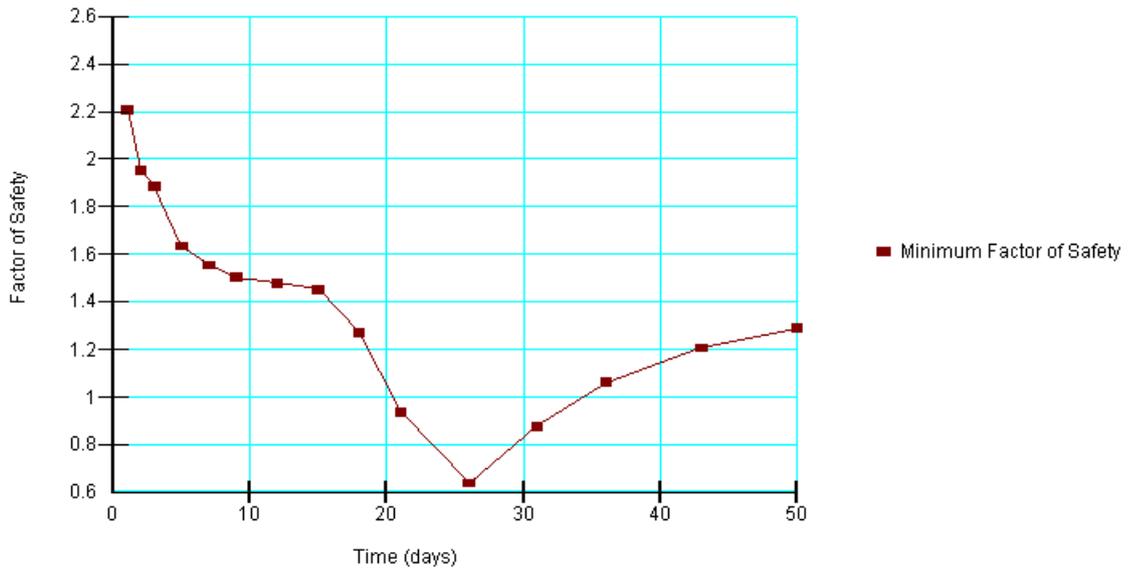


Gambar 4.22. Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 85 Dengan Kecepatan Penurunan 15 Hari



Gambar 4.23. Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 85 Dengan Kecepatan Penurunan 20 Hari





Gambar 4.24 Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 85 Dengan Kecepatan Penurunan 30 Hari

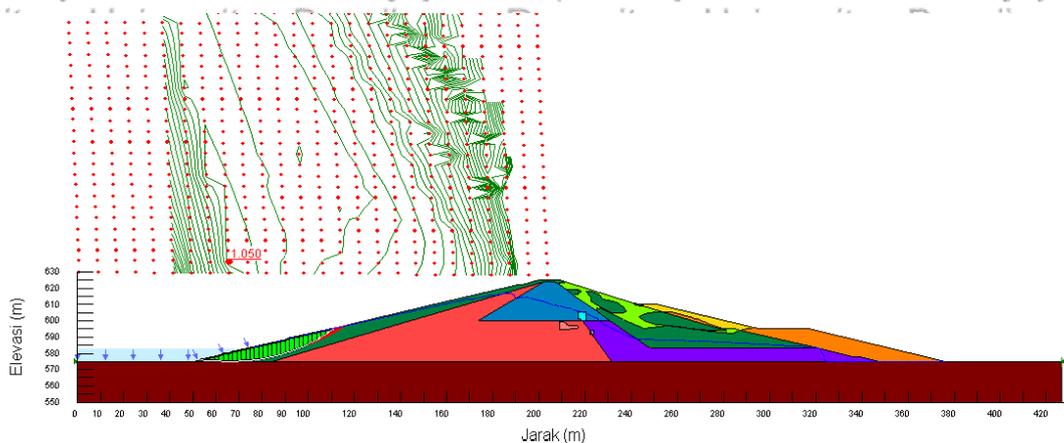
Dari grafik diatas menunjukkan perubahan faktor keamanan terhadap waktu akibat penurunan muka air cepat/*rapid drawdown* pada line 85. Pada penurunan selama 5 hari, didapatkan faktor keamanan terendah sebesar 0,202 pada hari ke 9. Pada penurunan selama 10 hari, didapatkan faktor keamanan terendah sebesar 0,234 pada hari ke 9. Pada penurunan selama 15 hari, didapatkan faktor keamanan terendah sebesar 0,311 pada hari ke 15. Pada penurunan selama 20 hari, didapatkan faktor keamanan terendah sebesar 0,336 pada hari ke 18. Pada penurunan selama 30 hari, didapatkan Faktor keamanan terendah sebesar 0,636 pada hari ke 26. Untuk perubahan faktor kemananan yang lebih lengkap dapat dilihat di tabel 4.4.

Tabel 4.4 Faktor Keamanan Akibat *Rapid Drawdown* pada line 85

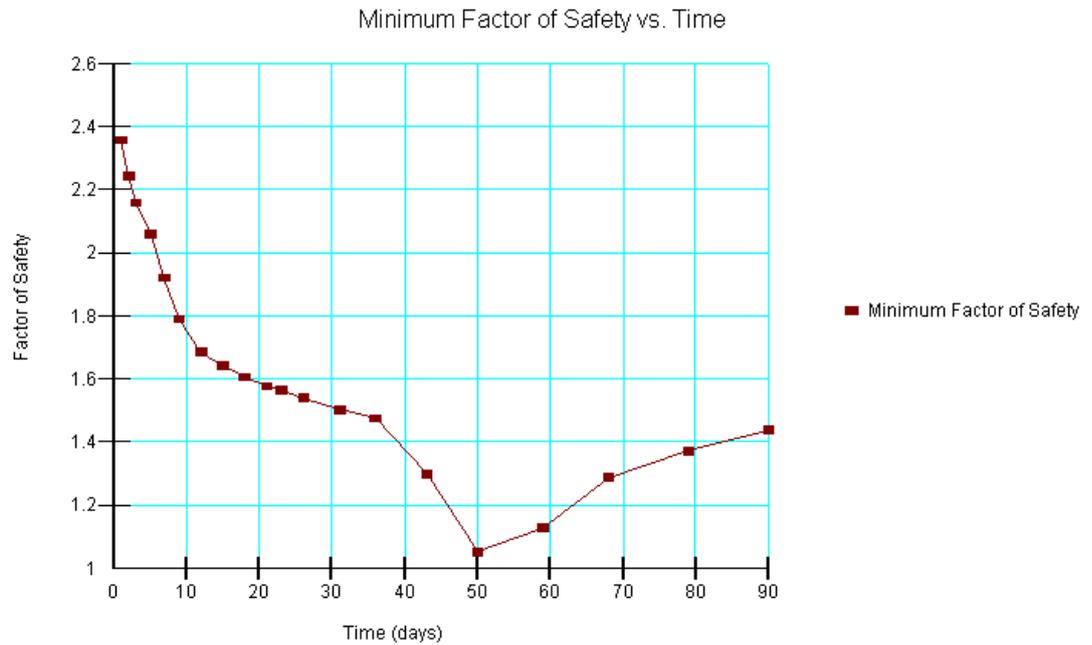
Hari ke	Kec. Penurunan				
	5 hari	10 hari	15 hari	20 hari	30 hari
1	1,372	1,475	1,58	1,919	2,208
2	0,841	1,425	1,601	1,856	1,956
3	0,341	1,341	1,534	1,595	1,889
5	0,238	0,687	1,55	1,503	1,635
7	0,274	0,415	1,133	1,461	1,556
9	0,202	0,234	0,674	1,371	1,503
12	0,597	0,279	0,398	0,97	1,48
15	0,797	0,636	0,311	0,403	1,451
18	0,936	0,829	0,662	0,336	1,273
21	1,039	0,965	0,848	0,665	0,938
26	1,153	1,112	1,033	0,93	0,636
31	1,23	1,213	1,153	1,086	0,876
36	1,279	1,286	1,238	1,191	1,062
43	1,33	1,356	1,31	1,277	1,207
50	1,37	1,41	1,361	1,332	1,291

Sumber : Hasil simulasi Geostudio

Dari tabel diatas, dapat dilihat bahwa pada line 85 Bendungan Selorejo berada dalam keadaan tidak stabil untuk kecepatan penurunan 5 sampai 30 hari. Hal ini diketahui dari nilai faktor keamanan bendungan yang dibawah 1. Maka perlu dicari kecepatan penurunan yang sesuai agar bendungan tetap aman walaupun dalam keadaan rapid drawdown. Didapat kecepatan penurunan selama 60 hari agar bendungan tetap dalam keadaan aman. Faktor keamanan selama penurunan 60 hari ditampilkan di Gambar 4.26 dan Tabel 4.5.



Gambar 4.25 Bidang Longsor Kritis Akibat Rapid Drawdown pada Line 85



Gambar 4.26 Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 85 Dengan Kecepatan Penurunan 60 Hari

Tabel 4.5 Faktor Keamanan dengan Kecepatan Penurunan 60 Hari

Hari ke	Faktor Keamanan
1	2,357
2	2,246
3	2,158
5	2,06
7	1,922
9	1,789
12	1,686
15	1,64
18	1,606
21	1,577
26	1,538
31	1,502
36	1,475
43	1,299
50	1,05
59	1,127
68	1,288
79	1,373
90	1,438

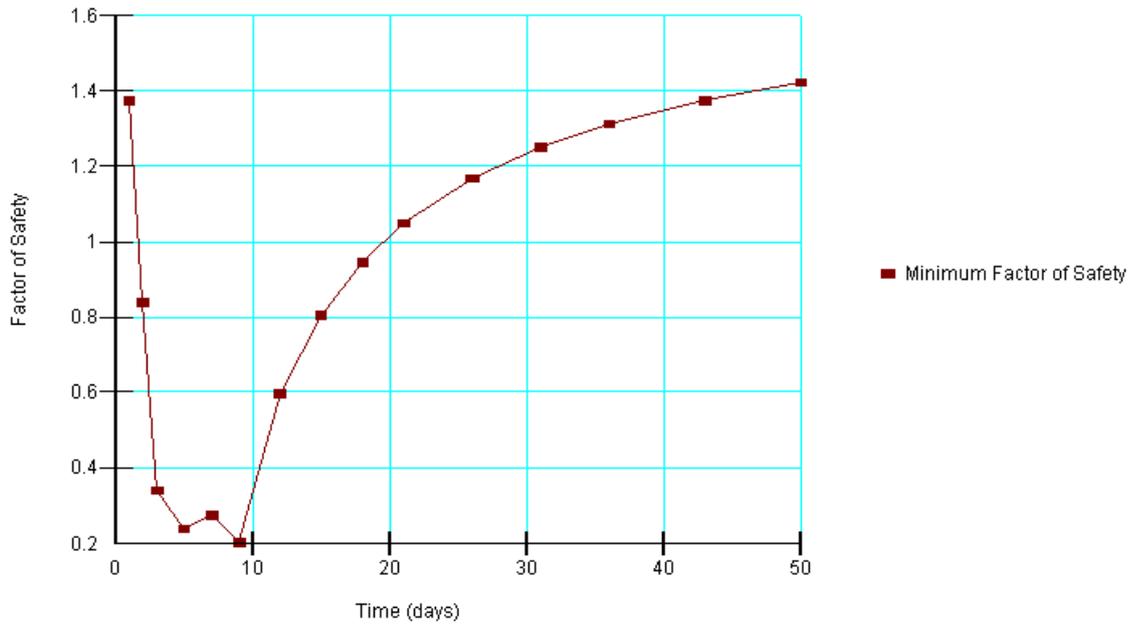
4.5.5 Analisa Hasil Simulasi Stabilitas Line 100

Tabel 4.6 Rekapitulasi Faktor Keamanan Kondisi 1-4 line 100 dengan Simulasi Geostudio

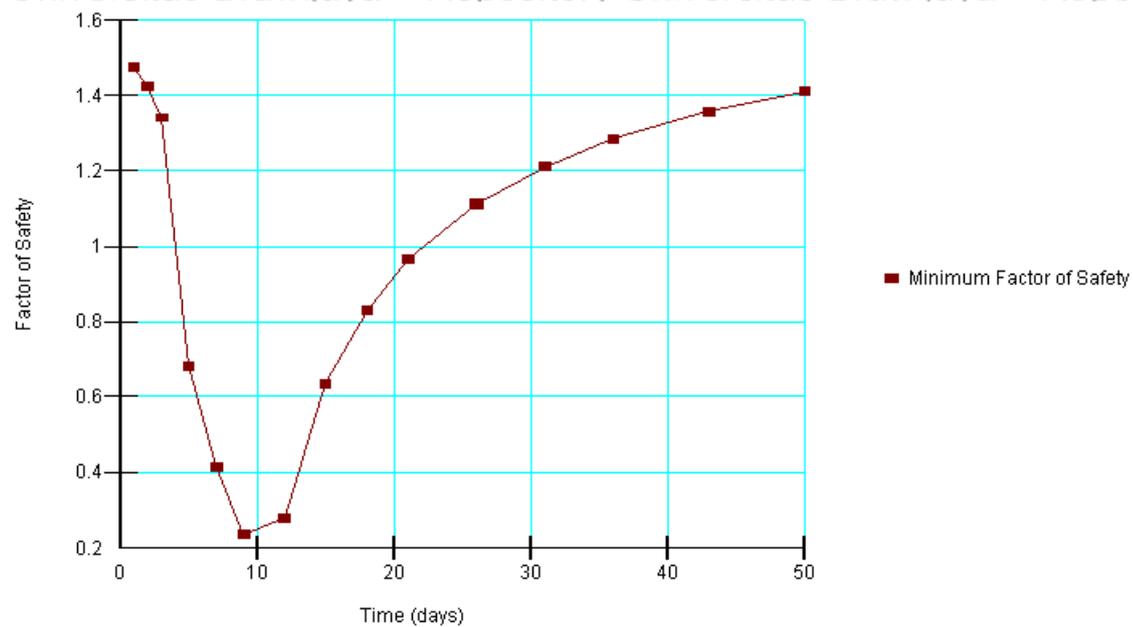
No	Kondisi	Metode	
		Ordinary (Fellenius)	Bishop
1	Kondisi 1 (Waduk kosong, +595)		
	- Hulu	2,355	2,431
	- Hilir	0,962	0,964
2	Kondisi 2 (+610)		
	- Hulu	2,315	2,408
	- Hilir	0,962	0,963
3	Kondisi 3 (+622)		
	- Hulu	2,496	2,408
	- Hilir	0,962	0,963
4	Kondisi 4 (+622,6)		
	- Hulu	2,200	2,506
	- Hilir	0,962	0,963

Sumber: Hasil simulasi

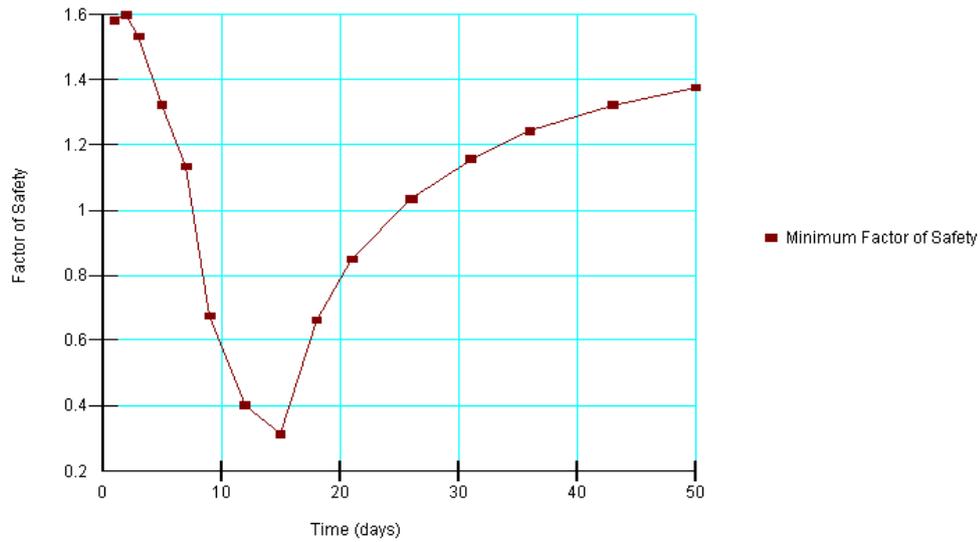
Pada kondisi ini bendungan berada dalam kondisi tidak aman, karena faktor keamanan bendungan terkecil adalah sebesar 0,932 pada bagian hilir bendungan. Untuk faktor keamanan akibat *rapid drawdown* pada line 100 juga dianalisis dengan variasi kecepatan penurunan 5, 10, 15, 20, dan 30 hari. Hasil dari simulasi menggunakan program Geostudio ditampilkan pada Gambar 4.27 sampai Gambar 4.31



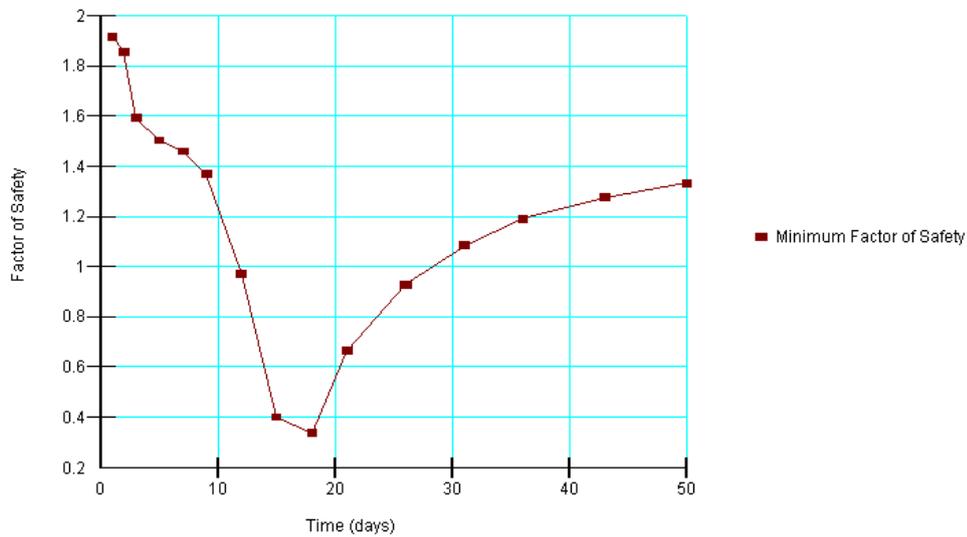
Gambar 4.27. Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 100 Dengan Kecepatan Penurunan 5 Hari



Gambar 4.28. Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 100 Dengan Kecepatan Penurunan 10 Hari

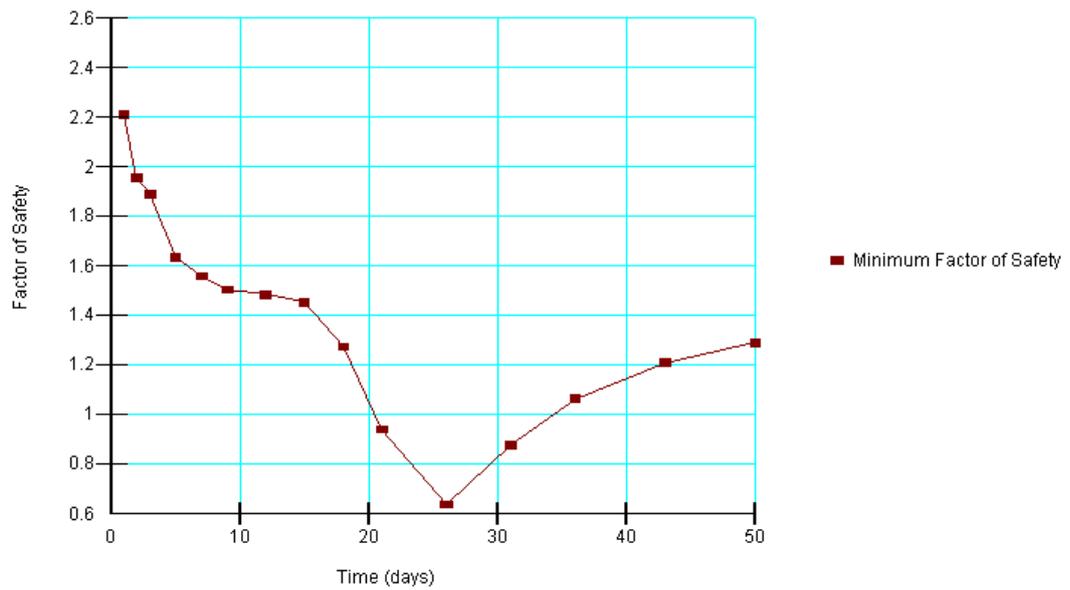


Gambar 4.29 Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 100 Dengan Kecepatan Penurunan 15 Hari



Gambar 4.30 Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 100 Dengan Kecepatan Penurunan 20 Hari





Gambar 4.31 Grafik Perubahan Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 100 Dengan Kecepatan Penurunan 30 Hari

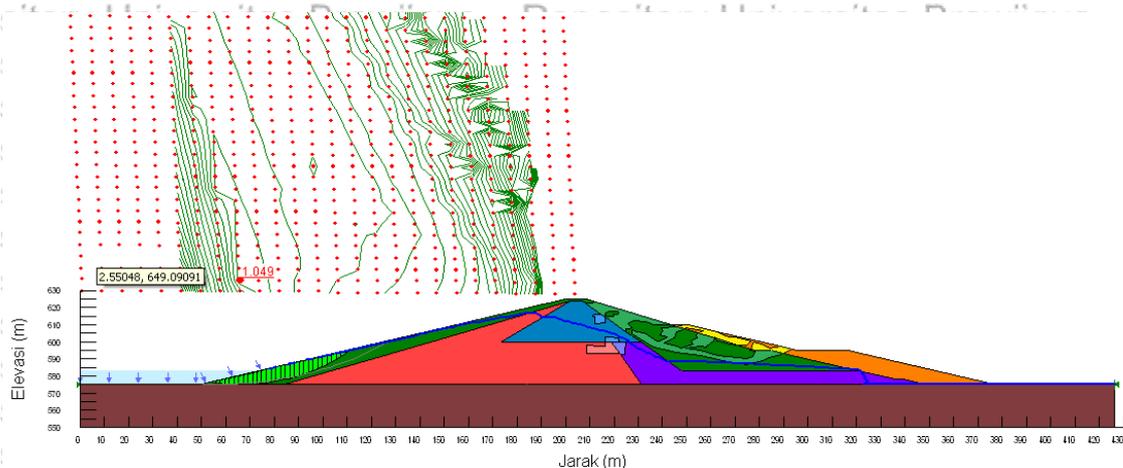
Dari grafik diatas menunjukkan perubahan faktor keamanan terhadap waktu akibat penurunan muka air cepat/*rapid drawdown*. Pada penurunan selama 5 hari, didapatkan faktor keamanan terendah sebesar 0,202 pada hari ke 9. Pada penurunan selama 10 hari, didapatkan faktor keamanan terendah sebesar 0,234 pada hari ke 9. Pada penurunan selama 15 hari, didapatkan faktor keamanan terendah sebesar 0,312 pada hari ke 15. Pada penurunan selama 20 hari, didapatkan faktor keamanan terendah sebesar 0,336 pada hari ke 18. Pada penurunan selama 30 hari, didapatkan Faktor keamanan terendah sebesar 0,636 pada hari ke 30. Untuk perubahan faktor kemananan yang lebih lengkap dapat dilihat di tabel 4.7.

Tabel 4.7 Faktor Keamanan Akibat *Rapid Drawdown* pada line 100

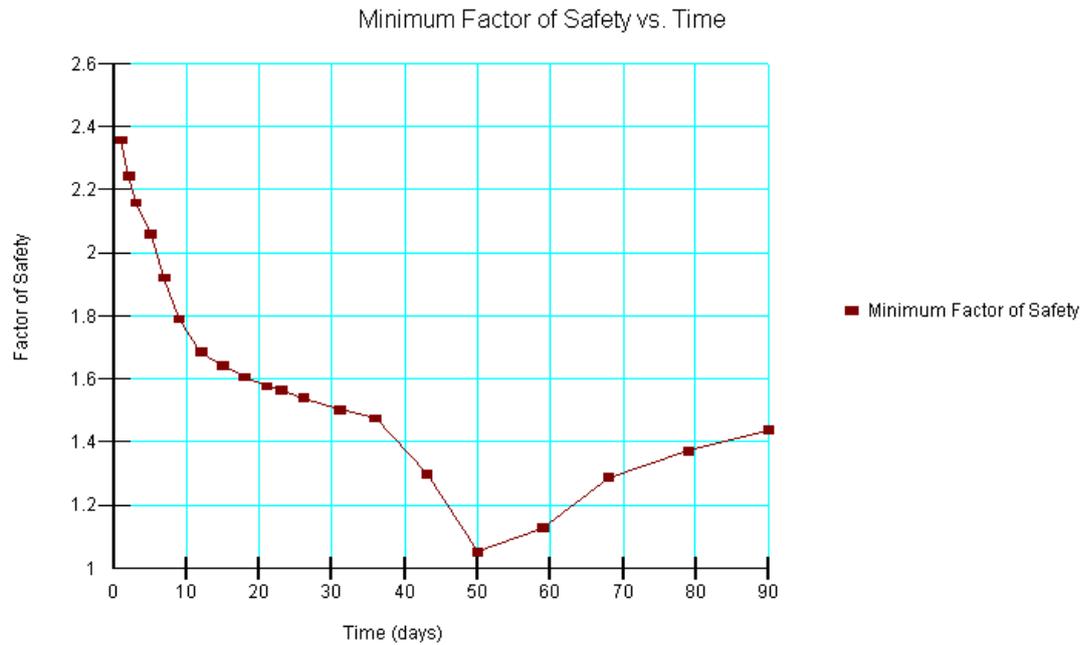
Kec. Penurunan/ Hari ke	5 hari	10 hari	15 hari	20 hari	30 hari
1	1,372	1,475	1,58	1,918	2,208
2	0,84	1,425	1,599	1,856	1,956
3	0,339	1,341	1,533	1,594	1,889
5	0,237	0,683	1,322	1,503	1,635
7	0,274	0,415	1,132	1,461	1,557
9	0,202	0,234	0,674	1,37	1,504
12	0,597	0,279	0,4	0,969	1,481
15	0,802	0,636	0,312	0,402	1,453
18	0,944	0,829	0,663	0,336	1,272
21	1,049	0,965	0,849	0,665	0,937
26	1,167	1,112	1,034	0,93	0,636
31	1,25	1,212	1,156	1,086	0,876
36	1,312	1,285	1,242	1,19	1,062
43	1,374	1,357	1,323	1,276	1,207
50	1,423	1,41	1,376	1,331	1,29

Sumber : Hasil simulasi Geostudio

Dari tabel diatas, dapat dilihat bahwa pada line 100 Bendungan Selorejo berada dalam keadaan tidak stabil untuk kecepatan penurunan 5 sampai 30 hari. Hal ini diketahui dari nilai faktor keamanan bendungan yang dibawah 1. Maka perlu dicari kecepatan penurunan yang sesuai agar bendungan tetap aman walaupun dalam keadaan rapid drawdown. Didapat kecepatan penurunan selama 60 hari agar bendungan tetap dalam keadaan aman. Faktor keamanan selama penurunan 60 hari ditampilkan di Gambar 4.33 dan Tabel 4.8



Gambar 4.32 Bidang Longsor Kritis Akibat Rapid Drawdown pada Line 100



Gambar 4.33 Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 100 Dengan Kecepatan Penurunan 60 Hari

Tabel 4.8 Faktor Keamanan dengan Kecepatan Penurunan 60 Hari

Hari ke	Faktor Keamanan
1	2,357
2	2,246
3	2,158
5	2,06
7	1,922
9	1,789
12	1,682
15	1,638
18	1,606
21	1,578
26	1,539
31	1,504
36	1,478
43	1,299
50	1,049
59	1,127
68	1,287
79	1,374
90	1,439

4.6. Pembahasan

Electrical resistivity tomography merupakan salah satu metode geofisika untuk mengetahui struktur lapisan tanah bawah permukaan dengan mendeteksi perubahan tahanan jenis lapisan batuan. Dilihat dari hasil interpretasi ERT, Bendungan Selorejo memiliki beberapa bagian yang diindikasikan terjadi rembesan air yang dapat membahayakan tubuh bendungan seperti di tampilan di Gambar 4.3

Dari analisis stabilitas bendungan menggunakan program Geostudio dapat dilihat bagaimana pengaruh lapisan tanah berdasarkan ERT terhadap kestabilan bendungan. Dari dua potongan melintang yang dianalisis, yaitu *line 85* dan *line 100* terdapat perbedaan hasil untuk bagian hilir yang tidak signifikan. Hal ini dikarenakan bidang longsor di bagian hilir cenderung tidak terlalu dalam sehingga pengaruh perbedaan lapisan dari hasil ERT tidak termanfaatkan. Begitu pula pada bagian hulu tidak terlihat perbedaan yang signifikan karena lapisan tanah hasil survey ERT berada di bagian hilir, meskipun bidang longsor yang terjadi cukup besar.

Pada analisis stabilitas berdasarkan *rapid drawdown* didapatkan penurunan faktor keamanan pada saat permukaan air mulai diturunkan hingga mencapai suatu saat dimana bendungan tersebut memiliki faktor keamanan yang paling kritis. Hal ini terjadi disebabkan lereng bagian hilir yang sebelumnya menerima tekanan air sebagai penyeimbang, tiba-tiba kehilangan tekanan tersebut. Sementara itu, tekanan air pori di tubuh bendungan tidak dapat turun secepat muka air, sehingga terjadi tekanan air pori berlebih (*excess pore pressure*) yang akibatnya membuat lereng tidak stabil. Setelah tekanan air pori bendungan mulai stabil, faktor keamanan bendungan kembali meningkat hingga lereng bendungan kembali aman dari longsor.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan, yaitu:

1. Menurut data survey ERT yang didapatkan, ada beberapa bagian yang memiliki nilai resistivitas yang rendah, mengindikasikan potensi kebocoran yang dapat membahayakan bagi bendungan.
2. Survey *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) tidak memperlihatkan perbedaan lapisan material bendungan dengan baik, hal ini disebabkan kemungkinan perubahan struktur lapisan bendungan yang telah berubah dari kondisi awalnya.
3. Dari hasil analisis dapat disimpulkan berdasarkan hasil survey ERT Bendungan Selorejo tidak aman untuk dikosongkan dengan metode *rapid drawdown* dengan kecepatan penurunan 1 sampai 30 hari. Hal ini ditunjukkan oleh memiliki faktor keamanan yang paling aman sebesar 0,808 pada hari ke 30 untuk kecepatan penurunan 30 hari. Kecepatan penurunan minimal agar bendungan tetap aman dalam kondisi *rapid drawdown* adalah selama 60 hari, dengan faktor keamanan kritis sebesar 1,050 pada hari ke 50.

5.2. Saran

Untuk menyempurnakan dan sekaligus pembandingan dengan kesimpulan dan hasil yang didapatkan dari penelitian ini maka hal yang menjadi saran untuk kedepannya adalah:

1. Untuk survey ERT, survey sebaiknya dilakukan di sepanjang bendungan dan juga dilakukan dari puncak bendungan hingga ke dasar, sehingga didapatkan hasil yang menyeluruh dan lengkap dari tubuh bendungan.
2. Penelitian terkait hubungan resistivitas terhadap sifat tanah dilakukan tersendiri untuk mendapatkan hasil yang lebih sesuai dengan keadaan lapangan.
3. Untuk pengaruh hasil survey ERT terhadap stabilitas pada kondisi *rapid drawdown*, sebaiknya survey dilakukan dengan mencari kondisi lapisan dibagian hulu untuk mendapatkan hasil yang lebih tepat.

DAFTAR PUSTAKA

- Arnevik, A. 2005. Introduction to Ground Penetrating Radar and its General Use Applied to Fault Investigation. University of Wisconsin.
- Craig, R. 2004. *Craig's Soil Mechanics (7th edition)*. London: Spon Press.
- Departemen Pekerjaan Umum. 1987. *Petunjuk Perencanaan Penganggulangan Longsoran, SKBI* – 2.3.06. Yayasan Badan Penerbit PU.
- E. Alonso, N. P. 2009. Slope stability under rapid drawdown conditions.
- Kementrian Pekerjaan Umum. 1976. Completion Report on Selorejo Dam Project. Malang
- Kementrian Pekerjaan Umum. 2014. *Bendungan Selorejo*. Dipetik April 24, 2014, dari Perpustakaan Kementrian Pekerjaan Umum: <http://pustaka.pu.go.id/new/infrastruktur-bendungan-detail.asp?id=156>
- Milsom, J. 2003. Field Geophysics. England: John Wiley & Sons Ltd.
- Murthy, V. 2002. *Geotechnical engineering: Principles and Practices of Soils Mechanics and Foundation Engineering*. New York: CRC Press.
- NGA. 2000. *D.C. Resistivity*. Dipetik Oktober 10, 2014, dari http://www.nga.com/Flyers_PDF/NGA_DC_Resistivity.pdf
- Reynolds, J. 2011. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Chichester: John Wiley & Sons.
- Soedibyo, I. 1993. Teknik Bendungan. Jakarta: PT Pradnya Paramita.
- Sosrodarsono, S., & Takeda, K. 2002. Bendungan Tipe Urugan. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Sowers, G. F. 1979. Soil Mechanics and Foundations : Geotechnical Engineering. New York: Macmillan Publishing.