

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

Auliya Nusyura Al Islami<sup>1</sup>, Eko Andi Suryo<sup>2</sup>, Arief Rachmansyah<sup>2</sup>

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

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

<sup>1</sup>auliyanusyura@gmail.com

## ABSTRAK

Sebagai bendungan tipe urugan yang sudah cukup berumur, Bendungan Selorejo memerlukan pemeriksaan sehubungan dengan keamanan konstruksi tersebut agar dapat terhindar dari kegagalan konstruksi. Salah satu kondisi kritis pada saat menganalisis stabilitas lereng bendungan urugan adalah kondisi *rapid drawdown* atau penurunan muka air cepat. Metode yang dipakai 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. Data parameter tanah juga dilengkapi dengan uji laboratorium untuk mengetahui hubungan kadar air terhadap nilai kohesi dan sudut geser pada material. Stabilitas bendungan terhadap *rapid drawdown* dianalisis menggunakan program Geostudio dengan variasi kecepatan penurunan selama 5 sampai 30 hari.

Dari penelitian ini dapat dilihat bahwa bendungan selorejo memiliki beberapa zona di tubuh bendungan yang memiliki resistivitas rendah dan diidentifikasi sebagai potensi rembesan yang membahayakan bendungan. 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 sampai 30 hari. Dengan metode coba-coba didapat kecepatan penurunan minimum agar aman adalah selama 60 hari dengan faktor keamanan sebesar 1,050.

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

## A. PENDAHULUAN

Bendungan Selorejo merupakan salah satu bendungan urugan yang berada Jawa Timur. Sebagai bendungan yang sudah cukup berumur, diperlukan pemeriksaan sehubungan keamanan konstruksinya untuk menghindari terjadinya kegagalan konstruksi. Dalam perhitungan stabilitas lereng bendungan diperlukan data lapisan tanah bawah permukaan. Untuk mendapat data tersebut biasanya dilakukan *test bore hole* untuk mengetahui kondisi bawah permukaan. Namun metode ini tidak dapat dilakukan pada bendungan karena dapat menimbulkan piping atau kebocoran pada tubuh bendungan.

Metode alternatif untuk mengetahui lapisan bawah permukaan adalah dengan

metode geofisika, salah satunya adalah metode geolistrik atau *Electrical Resistivity Tomography* (ERT). 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. Metode ERT menentukan jenis tanah menggunakan perbedaan hambatan listrik di masing-masing jenis tanah yang diteliti. Dengan metode ini maka dapat diketahui lapisan bawah permukaan bendungan tanpa merusak lapisan tersebut.

Dalam analisis stabilitas lereng salah satu kondisi kritis yang harus diperhatikan adalah kondisi *rapid drawdown* atau penurunan muka air cepat. 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

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi subsurface Bendungan Selorejo berdasarkan survey Electrical Resistivity Tomography (ERT) dan juga untuk mengetahui stabilitas Bendungan Selorejo saat ini akibat *rapid drawdown*.

## B. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan pada penelitian ini adalah ini adalah dengan mengambil data lapisan tanah menggunakan Alat *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) pada tubuh Bendungan Selorejo.

Selanjutnya uji laboratorium untuk mengetahui pengaruh nilai resistivitas terhadap besarnya kadar air, kohesi dan sudut geser dari material. Uji yang dilakukan berupa:

1) 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.

2) Uji ERT pada material untuk mengetahui hubungan kadar air (water content) terhadap resistivitas. 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 ( $\gamma_d$ ) 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.

3) Uji direct shear untuk mengetahui pengaruh kadar air terhadap nilai kohesi (c) dan sudut geser ( $\phi$ ).

Adapun untuk kondisi permukaan air yang akan digunakan dalam simulasi ditampilkan pada tabel 1

Tabel 1 Kondisi Muka Air pada Simulasi

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

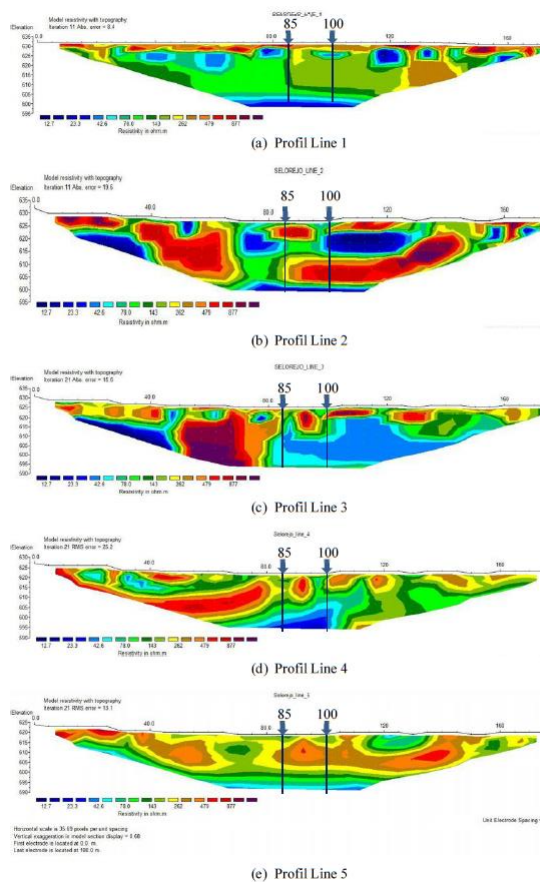
Pada kondisi muka air surut cepat (*Rapid Drawdown*) dengan skenario penurunan muka air dari +622 ke +575. Dibuat skenario yang dibedakan oleh waktu penurunan muka air. Pemilihan variasi waktu penurunan mengacu pada terminologi rapid/cepat dimana penurunan dinyatakan sebagai *rapid drawdown* jika lajunya 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*

## C. HASIL DAN PEMBAHASAN

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 1 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.

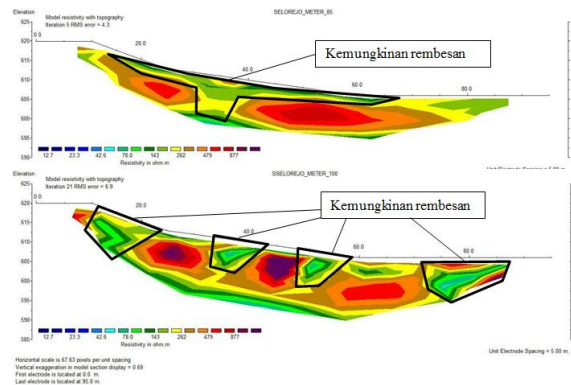
Hasil yang didapatkan dari survey ERT pada tubuh bendungan ditampilkan pada gambar 1



Gambar 1 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

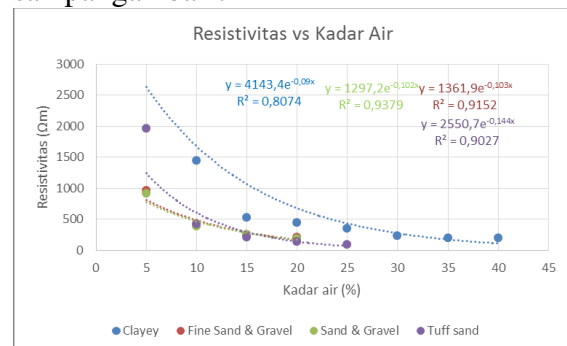
yang kemungkinan memiliki profil paling kritis. Hasil dari survey profil melintang ini ditampilkan pada Gambar 2.



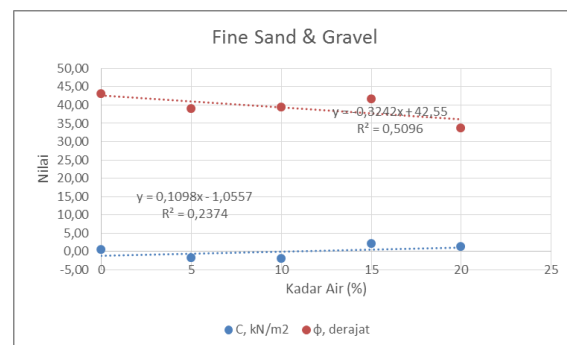
Gambar 2 Interpretasi hasil survey ERT profil melintang line 85 dan 100

### Hasil Uji Lab

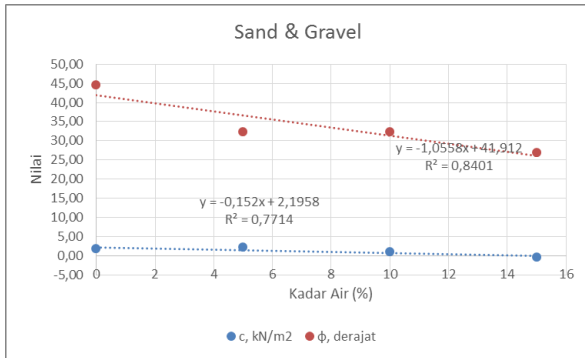
Sampel tanah yang diambil dari *quary* bendungan digunakan untuk mengetahui klasifikasi dan hubungan antara resistivitas dengan nilai kadar air, sudut geser dan kohesi yang nantinya digunakan pada saat analisis stabilitas bendungan. Hasil dari uji laboratorium ditampilkan pada gambar 3 sampai gambar 7



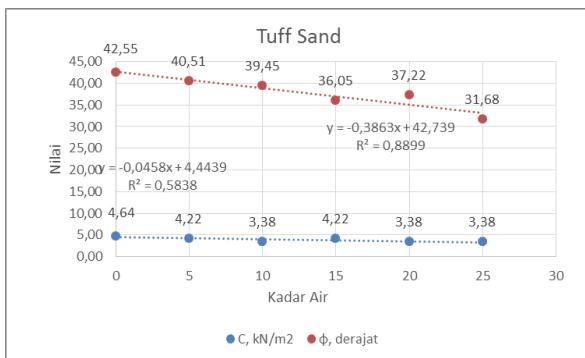
Gambar 3 Grafik hubungan nilai resistivitas terhadap kadar air



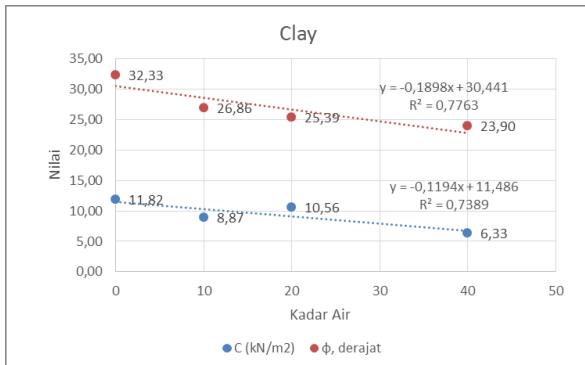
Gambar 4 Grafik hubungan kadar air terhadap phi ( $\phi$ ) dan kohesi pada *Fine Sand & Gravel*



Gambar 5 Grafik hubungan kadar air terhadap phi ( $\phi$ ) dan kohesi pada Sand & Gravel



Gambar 6 Grafik hubungan kadar air terhadap phi ( $\phi$ ) dan kohesi pada tuff sand



Gambar 7 Grafik hubungan kadar air terhadap phi ( $\phi$ ) dan kohesi pada clay

Dari gambar 3 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.

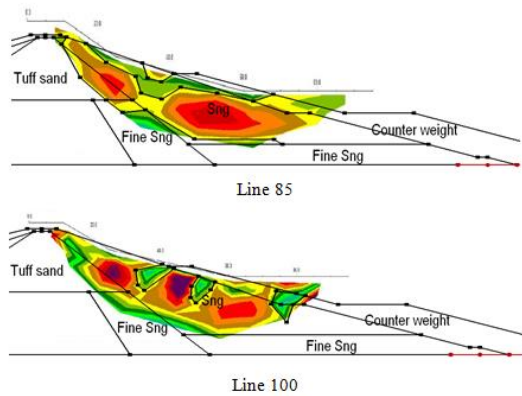
Sebelumnya sudah dibahas mengenai kemungkinan terjadinya rembesan yang diindikasikan oleh perbedaan resistivitas. Zona dengan nilai resistivitas lemah berada sekitar nilai 202,5  $\Omega$ m, kemudian dihubungkan dengan grafik untuk didapatkan nilai kohesi dan sudut geser pada zona tersebut. Hasil dari perhitungan ini kemudian digunakan sebagai parameter tanah yang digunakan pada simulasi. Data parameter hasil perhitungan ditampilkan pada tabel 2.

Tabel 2 Data spesifik material Bendungan Selorejo daerah lemah

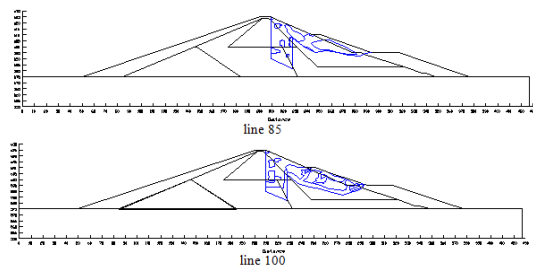
Material	Dry Density ( $\gamma_d$ )	Kadar Air (%)	Kohesi (c)	Sudut Geser ( $\phi$ )
Clay	1,25	33,53	7,480	24,077
Sand & Gravel	2,072	18,208	-	22,687
Tuff Sand	1,603	17,59	3,637	35,943
Fine Sand & Gravel	1,772	18,5	-	36,552

### 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.



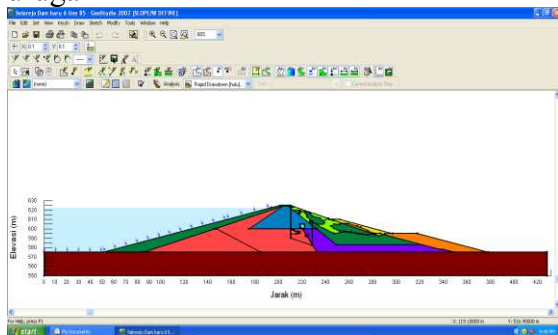
Gambar 8 Pembuatan Layer Lapisan Bendungan Berdasarkan Hasil ERT



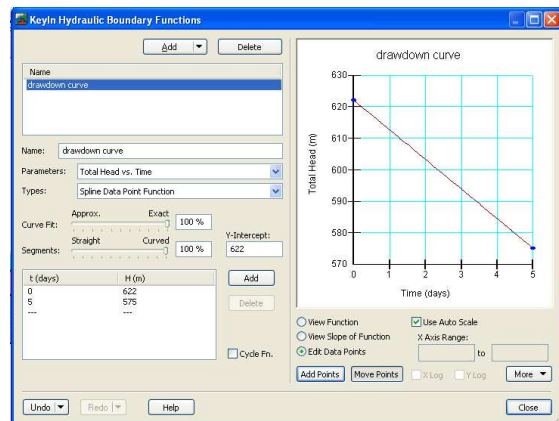
Gambar 9 Plotting Hasil ERT ke Program Geostudio

### Simulasi Geostudio 2007

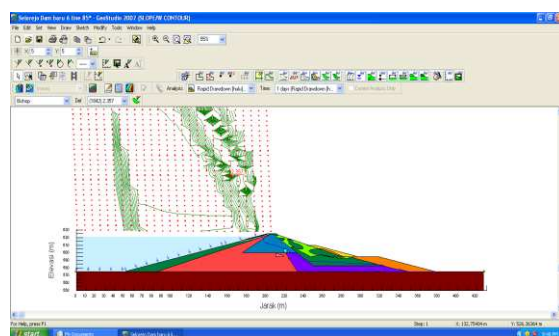
Simulasi untuk mengetahui kestabilan Bendungan Selorejo menggunakan dua kali simulasi, yaitu dengan simulasi menggunakan program Geostudio dengan metode Bishop dan *ordinary* (Fellenius). Dua simulasi tersebut menggunakan data parameter tanah dan gambar dari Bendungan Selorejo. Kondisi yang diasumsikan mengacu pada standar perhitungan stabilitas menggunakan “Pedoman analisis stabilitas bendungan urugan”



Gambar 10 Input Tekanan Air Pori Pada Tubuh Bendungan



Gambar 11 Input Kondisi *Rapid Drawdown* pada Program Geostudio



Gambar 12 Proses Pencarian Titik Kritis dengan Kontur

### Line 85

Tabel 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 - Hilir	2,355	2,431
		0,962	0,964
2	Kondisi 2 (+610) - Hulu - Hilir	2,315	2,408
		0,962	0,963
3	Kondisi 3 (+622) - Hulu - Hilir	2,496	2,408
		0,962	0,963
4	Kondisi 4 (+622,6) - Hulu - Hilir	2,200	2,506
		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* pada line 100 juga dianalisis dengan variasi kecepatan penurunan 5, 10, 15, 20, dan 30 hari. Faktor keamanan bendungan terhadap *rapid drawdown* dapat dilihat di tabel 4

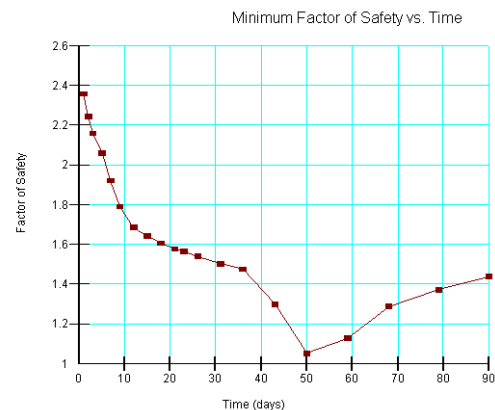
Tabel 4 Faktor Keamanan Akibat *Rapid Drawdown* pada line 85

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

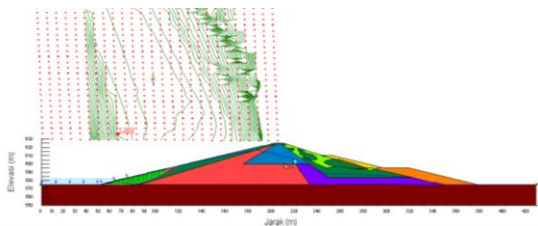
Dari tabel diatas, dapat dilihat bahwa pada line 85 Bendungan Selorejo berada dalam keadaan tidak stabil untuk kecepatan penurunan 5 sampai 30 hari. Hal ini diketahui dari nilai faktor keamanan bendungan yang dibawah 1. Maka perlu dicari kecepatan penurunan yang sesuai agar bendungan tetap aman walaupun 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 14 dan Tabel 5.

Tabel 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



Gambar 14 Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 85 Dengan Kecepatan Penurunan 60 Hari



Gambar 13 Bidang Longsor Kritis Akibat *Rapid Drawdown* pada Line 85

### Line 100

Tabel 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 - Hilir	2,355	2,431
		0,962	0,964
2	Kondisi 2 (+610) - Hulu - Hilir	2,315	2,408
		0,962	0,963
3	Kondisi 3 (+622) - Hulu - Hilir	2,496	2,408
		0,962	0,963
4	Kondisi 4 (+622,6) - Hulu - Hilir	2,200	2,506
		0,962	0,963

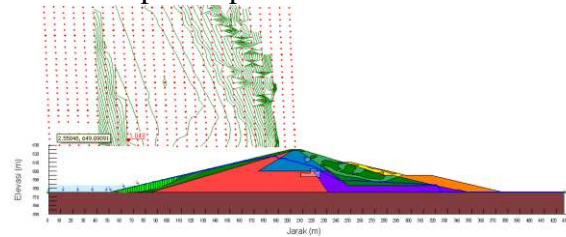
Pada kondisi ini bendungan berada dalam kondisi tidak aman, karena faktor keamanan bendungan terkecil adalah sebesar 0,932 pada bagian hilir bendungan. Untuk faktor keamanan akibat *rapid drawdown* pada line 100 juga dianalisis dengan variasi kecepatan penurunan 5, 10, 15, 20, dan 30 hari

Tabel 7 Faktor Keamanan Akibat *Rapid Drawdown* pada line 100

Kec. Penurunan Hari ke	Kec. Penurunan				
	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

Dari tabel diatas, dapat dilihat bahwa pada line 100 Bendungan Selorejo berada dalam keadaan tidak stabil untuk kecepatan penurunan 5 sampai 30 hari. Hal

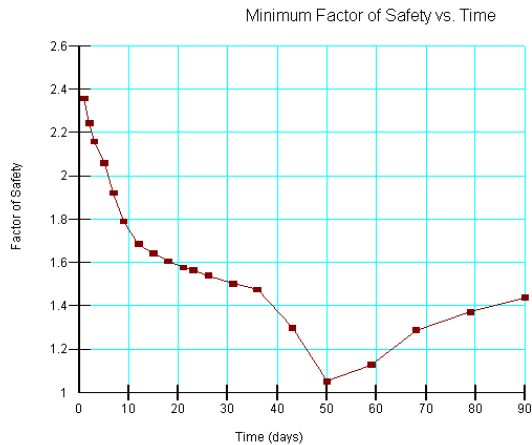
ini diketahui dari nilai faktor keamanan bendungan yang dibawah 1. Maka perlu dicari kecepatan penurunan yang sesuai agar bendungan tetap aman walaupun dalam keadaan *rapid drawdown*. Didapat kecepatan penurunan selama 60 hari agar bendungan tetap dalam keadaan aman. Faktor keamanan selama penurunan 60 hari ditampilkan pada Tabel 4.8



Gambar 15 Bidang Longsor Kritis Akibat *Rapid Drawdown* pada Line 100

Tabel 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



Gambar 16 Grafik Faktor Keamanan Terhadap Waktu Pada Line 100 Dengan Kecepatan Penurunan 60 Hari

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 dimanfaatkan. 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.

#### D. 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

#### SARAN

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 di bagian hulu untuk mendapatkan hasil yang lebih tepat.

#### DAFTAR PUSTAKA

- E. Alonso, N. P. 2009. *Slope Stability Under Rapid Drawdown Conditions*.  
Kementrian Pekerjaan Umum. 1976. *Completion Report on Selorejo Dam Project*. Malang.  
Departemen Pekerjaan Umum. 1987. *Petunjuk Perencanaan Penganggungan Longsoran, SKBI – 2.3.06*. Yayasan Badan Penerbit PU.  
Craig, R. 2004. *Craig's Soil Mechanics (7th edition)*. London: Spon Press.