



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISA LERENG BENDUNGAN TANAH
PADA KONDISI RAPID DRAWDOWN
DENGAN PERANGKAT LUNAK GEOSTUDIO**

SKRIPSI

**RANGGA PERMANA LIMIANTO
0606072622**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA
DEPOK
JANUARI 2011**

1000/FT.01/SKRIP/01/2011



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISA LERENG BENDUNGAN TANAH
PADA KONDISI RAPID DRAWDOWN
DENGAN PERANGKAT LUNAK GEOSTUDIO**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**RANGGA PERMANA LIMIANTO
0606072622**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
KEKHUSUSAN GEOTEKNIK
DEPOK
JANUARI 2011**

1000/FT.01/SKRIP/01/2011



UNIVERSITY OF INDONESIA

**EARTH DAM SLOPE ANALYSIS ON RAPID DRAWDOWN
CONDITION WITH GEOSTUDIO SOFTWARE**

UNDERGRADUATE THESIS

Proposed as one of the requirements to obtain a Bachelor of Engineering

**RANGGA PERMANA LIMIANTO
0606072622**

**FACULTY OF ENGINEERING
CIVIL ENGINEERING STUDY PROGRAM
DEPOK
JANUARY 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Rangga Permana Limianto

NPM : 0606072622

Tanda Tangan :

Tanggal : 11 Januari 2011

PAGE OF ORIGINALITY STATEMENT

**This undergraduate thesis is the result of my own research,
and all of the references either quoted or referred
have been stated correctly.**

Name : Rangga Permana Limianto

NPM : 0606072622

Signature :

Date : January, 11th 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Rangga Permana Limianto
NPM : 0606072622
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Skripsi : Analisa Lereng Bendungan Tanah Pada Kondisi Rapid Drawdown Dengan Perangkat Lunak GEOSTUDIO

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Damrizal Damoerin, M.Sc (.....)

Penguji : Ir. Widjojo A Prakoso, M.Sc, Ph.D, (.....)

Penguji : Dr. Ir. Wiwik Rahayu M.T. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 11 Januari 2011

APPROVAL PAGE

This Undergraduate Thesis is submitted by :

Name : Rangga Permana Limianto
NPM : 0606072622
Study Program : Civil Engineering
Title : Earth Dam Slope Analysis on Rapid Drawdown
Condition with GEOSTUDIO Software

Has been successfully defended in front of the Council of Examiners and was accepted as part of the requirements necessary to obtain a Bachelor of Engineering degree in Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, University of Indonesia.

COUNCIL OF EXAMINERS

Supervisor : Dr. Ir. Damrizal Damoerin, M.Sc. (.....)

Examiner : Ir. Widjojo A. Prakoso M.Sc., Ph.D (.....)

Examiner : Dr. Ir. Wiwik Rahayu M.T. (.....)

Defined in : Depok

Date : January, 11th 2011

KATA PENGANTAR

Puji Syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas segala nikmat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini dengan baik. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini tidak akan selesai tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

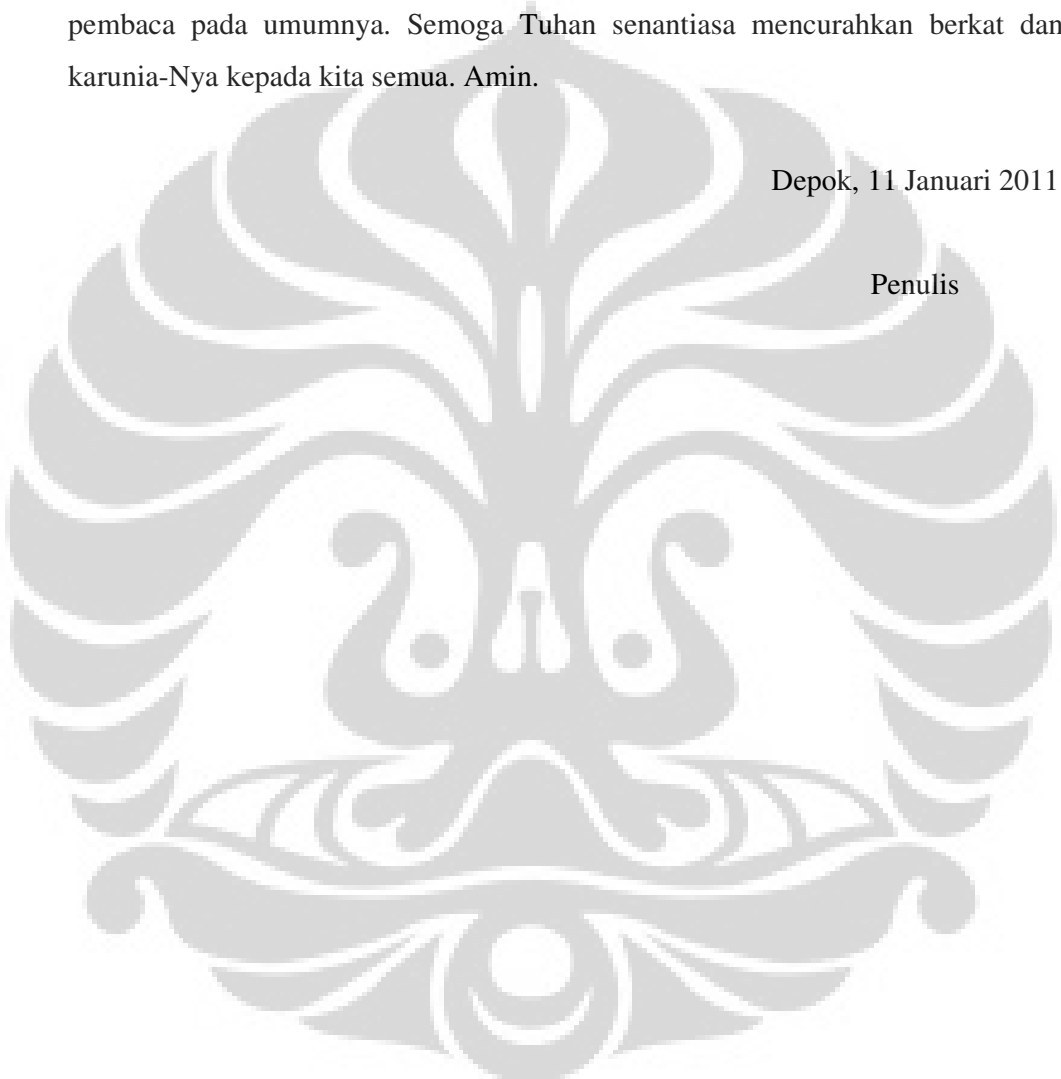
1. Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan kesabaran, dan kekuatan kepada saya untuk menyelesaikan skripsi ini
2. Kedua Orang Tua dan kakak saya yang telah memberikan bantuan dukungan material, moral, dan spiritual.
3. Dr. Ir. Damrizal Damoerin, M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu dan tenaga untuk membimbing dan mengarahkan dalam penulisan skripsi ini.
4. Ir. Widjojo A Prakoso, M.Sc, Ph.D dan Dr. Ir. Wiwik Rahayu M.T. selaku dosen penguji yang telah memberi kritik dan saran untuk penulisan skripsi ini.
5. Prof. Paulus P. Rahardjo, Ph.D, Bapak Yunan Halim, Bapak Bondan, dan segenap kru Geotechnical Engineering Consultant (GEC) yang telah meluangkan waktunya untuk saya, dan telah bersedia membimbing saya dalam proses pemodelan dengan perangkat lunak GeoStudio.
6. Laboran di laboratorium mekanika tanah Pak Sunarto, Pak Wardoyo, dan Mas Anto yang
7. Seluruh Dosen Sipil dan Lingkungan yang telah memberi ilmu dan pengetahuan yang luas kepada saya.
8. Seluruh sahabat saya angkatan Teknik Sipil 2006 Universitas Indonesia, terkhusus buat *geotekers* yang selama ini saling memberikan dukungan satu sama lain sehingga kita tetap solid.
9. Seluruh teman di UKM *Dancesport* UI yang telah membagi pengalaman di semester akhir kuliah saya di Universitas Indonesia

10. Seluruh teman dan sahabat yang tidak bisa disebutkan satu persatu disini.
11. Karyawan Departemen Teknik Sipil yang selalu ramah dan siap membantu.

Akhirnya, dengan selesainya penulisan skripsi ini, penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberi manfaat bagi penulis pada khususnya dan bagi pembaca pada umumnya. Semoga Tuhan senantiasa mencurahkan berkat dan karunia-Nya kepada kita semua. Amin.

Depok, 11 Januari 2011

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rangga Permana Limianto
NPM : 0606072622
Program Studi : Teknik Sipil
Departemen : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**ANALISA LERENG BENDUNGAN TANAH
PADA KONDISI RAPID DRAWDOWN
DENGAN PERANGKAT LUNAK GEOSTUDIO**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 11 Januari 2011

Yang menyatakan

(Rangga Permana Limianto)

ABSTRAK

Nama : Rangga Permana Limianto
Program Studi : Teknik Sipil
Judul : Analisa Lereng Bendungan Tanah pada Kondisi *Rapid Drawdown* dengan Perangkat Lunak GEOSTUDIO

Bendungan urugan merupakan konstruksi yang dibangun untuk menahan laju air, yang dibangun dengan cara menimbunkan bahan-bahan seperti : batu, krakal, kerikil, pasir dan tanah pada komposisi tertentu. Dalam pembangunan bendungan urugan, perlu diperhatikan stabilitas lerengnya. 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. Dalam penelitian ini, dilakukan pemodelan kondisi *rapid drawdown* pada Bendungan Nakasato. Geometri dan properti bendungan yang digunakan berasal dari referensi (Sosrodarsono, & Takeda. 1977). Pemodelan dilakukan dengan perangkat lunak GEOSTUDIO, yang terbagi menjadi 2, yaitu SLOPE/W untuk mencari nilai faktor keamanan lereng bendungan, dan SEEP/W untuk mencari *phreatic line* pada tubuh bendungan ketika terjadi *drawdown*. Kemudian pemodelan akan digabung (SLOPE/W+SEEP/W) untuk mencari nilai faktor keamanan pada tubuh bendungan dengan *phreatic line* yang telah diperhitungkan.

Kata-kata kunci: Bendungan Urugan, Stabilisas lereng, *Rapid Drawdown*, SLOPE/W, SEEP/W, *Phreatic Line*.

ABSTRACT

Name : Rangga Permana Limianto
Study Program : Civil Engineer
Title : Earth Dam Slope Analysis on Rapid Drawdown Condition with GEOSTUDIO Software.

Earth dam is a structure to accumulate water flow, which is constructed with filling materials, such as : rock, gravel, sand, and soil with its composition. In the construction of earth dam, it is important to note the stability of the slope. Problem that should be considered in calculating the factor of safety of the slope is the rapid drawdown condition, when the dam water level dropped suddenly. In this study, performed modeling of rapid drawdown condition on Nakasato Dam, Geometry and property of the dam taken from the reference (Sosrodarsono, & Takeda. 1977). The Modeling is done by GEOSTUDIO Software, which is divided into two, which are SLOPE/W to calculate the factor of safety of the earth dam, and SEEP/W to find the phreatic line in the body of the dam when drawdown occur. Then the model will be merged (SLOPE/W+SEEP/W) to find the factor of safety with phreatic line that has been taken into account.

Key words: Earth Dam, Slope Stability, Rapid Drawdown, SLOPE/W, SEEP/W, Phreatic Line.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
KATA PENGANTAR	vii
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	ix
ABSTRAK	x
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Permasalahan	2
1.3. Ruang Lingkup Pembahasan	2
1.4. Tujuan Penelitian	2
1.5. Sistematika Penelitian	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
II.1. Bendungan Urugan.....	4
II.2. Klasifikasi Bendungan Urugan	4
II.3. Karakteristik Bendungan Urugan.....	5
II.4. Lereng	7
II.5. Faktor-faktor yang Menyebabkan Kelongsoran Lereng.....	7
II.6. Jenis-jenis Kelongsoran Lereng	10
II.7. Prinsip Teori Analisa Kestabilan Lereng.....	12
II.8. Analisa dan Perhitungan untuk Stabilitas Tubuh Bendungan Urugan	15
II.8.1. Gaya – Gaya yang Bekerja pada Bendungan Urugan	15
II.8.2. Stabilitas Lereng Bendungan Urugan.....	19
II.8.3. Stabilitas Bendungan Terhadap Aliran Air Filtrasi.....	22
II.9. Stabilitas Lereng Bendungan Tanah pada Kondisi Rapid Drawdown	22
II.10. Uji Laboratorium Parameter Kuat Geser Tanah untuk Kondisi Rapid Drawdown	29
II.11. Teori Penggunaan Perangkat Lunak SLOPE/W	30
II.12. Teori Penggunaan Perangkat Lunak SEEP/W	31
II.12.1. Muka air (Water Head).....	31
II.12.2. Koefisien Permeabilitas	32
III. METODOLOGI PENELITIAN	33
III.1. Pemilihan Kasus.....	33
III.2. Pemodelan dengan SLOPE/W	34
III.2.1. Geometri dan properti bendungan.....	34
III.2.2. Tahapan dalam menggunakan software SLOPE/W	35

III.2.3. Metode Pemodelan Rapid Drawdown dengan SLOPE/W	39
III.3. Pemodelan dengan SEEP/W	41
III.3.1. Geometri dan properti bendungan.....	41
III.3.2. Tahapan dalam menggunakan software SEEP/W.....	43
III.3.3. Metode Pemodelan kondisi Rapid Drawdown dengan SEEP/W... ..	44
III.4. Pemodelan dengan SLOPE/W + SEEP/W	51
III.5. Ringkasan pemodelan pada penelitian	53
III.6. Diagram Alir Penelitian.....	55
III.6.1. Diagram Alir Sistematika Pengerjaan Skripsi	55
III.6.2. Diagram Alir Pemodelan dengan SLOPE/W	56
III.6.3. Diagram Alir Pemodelan dengan SEEP/W	57
IV. ANALISA HASIL PEMODELAN.....	58
IV.1. Analisa faktor keamanan lereng Bendungan Nakasato asli dengan SLOPE/W	60
IV.1.1. Nilai faktor keamanan Bendungan Nakasato kondisi pertama.....	61
IV.1.2. Nilai faktor keamanan Bendungan Nakasato kondisi kedua.....	62
IV.1.3. Nilai faktor keamanan Bendungan Nakasato kondisi ketiga.....	63
IV.2. Analisa faktor keamanan lereng Bendungan Nakasato yang disederhanakan dengan SLOPE/W +SEEP/W	65
IV.2.1. Penyederhanaan bendungan 1 material.....	65
IV.2.2. Penyederhanaan bendungan 2 material	70
IV.3. Analisa nilai Faktor Keamanan	73
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	80
V.1. Kesimpulan	80
V.2. Saran.....	81
DAFTAR REFERENSI	82
DAFTAR LAMPIRAN	
Lampiran 1. Pedoman koordinat geometri Bendungan Nakasato dan bendungan yang disederhanakan.	
Lampiran 2. Tekanan air pori pada tubuh bendungan 1 material pada variasi kecepatan drawdown.	
Lampiran 3. Tekanan air pori pada tubuh bendungan 2 material pada variasi kecepatan drawdown.	
Lampiran 4. Tekanan air pori pada irisan bidang longsor bendungan 1 material.	
Lampiran 5. Tekanan air pori pada irisan bidang longsor bendungan 2 material.	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Longsoran Jatuhan	10
Gambar 2.2.	Longsoran blok translasi	11
Gambar 2.3.	Longsoran blok rotasi	11
Gambar 2.4.	Lateral Spreading	12
Gambar 2.5.	Longsoran aliran	12
Gambar 2.6.	Skema pembebanan yang disebabkan oleh tekanan hidrostatik pada bidang luncur	16
Gambar 2.7.	Gaya – gaya pada irisan bidang luncur	21
Gambar 2.8.	Potongan bendungan untuk kondisi drawdown (Morgenstern,1963)	24
Gambar 2.9.	Grafik Stabilitas Drawdown untuk $c'/\gamma H = 0.0125$ (Morgenstern, 1963)	25
Gambar 2.10.	Grafik Stabilitas Drawdown untuk $c'/\gamma H = 0.025$ (Morgenstern, 1963)	26
Gambar 2.11.	Garis phreatic setelah drawdown : a. fully slow drawdown; b. transient drawdown;c. fully rapid drawdown; d. drawdown rate.	29
Gambar 2.12.	Ilustrasi aliran air pada tanah dari kondisi jenuh ke kondisi tidak jenuh (SEEP/W Manual, 2004)	32
Gambar 3.1.	Geometri Bendungan Nakasato	34
Gambar 3.2.	Pengaturan Awal Pada SLOPE/W	36
Gambar 3.3.	Penentuan Properti Tanah Pada SLOPE/W	36
Gambar 3.4.	Penentuan Titik - titik Acuan Pada SLOPE/W	37
Gambar 3.5.	Menggambarkan Geometri Lereng Pada SLOPE/W	37
Gambar 3.6.	Menggambar Garis Pada SLOPE/W	38
Gambar 3.7.	Grid Dan Radius Keruntuhan	38
Gambar 3.8.	Faktor Keamanan Sebagai Output SLOPE/W	39
Gambar 3.9.	Ilustrasi kondisi pada saat air penuh.	40
Gambar 3.10.	Ilustrasi kondisi pada saat rapid drawdown.....	41
Gambar 3.11.	Geometri Nakasato yang telah disederhanakan (1 material).....	42
Gambar 3.12.	Geometri Nakasato yang telah disederhanakan (2 material).....	42
Gambar 3.13.	Fungsi koefisien permeabilitas untuk Zona Kedap Air 1	46
Gambar 3.14.	Fungsi koefisien permeabilitas untuk Zona Kedap Air 2	47
Gambar 3.15.	Fungsi koefisien permeabilitas untuk Drainage Filter	48
Gambar 3.16.	Input Water Head pada pemodelan bendungan kondisi steady state	49
Gambar 3.17.	Time Stepping	50
Gambar 3.18.	Fungsi batas muka air	51
Gambar 3.19.	Input Water Head pada pemodelan bendungan kondisi transient.....	51
Gambar 3.20.	Pengaturan Pore Water Pressure dari SEEP/W pada analisis SLOPE/W	52
Gambar 3.21.	Geometri dan properti tanah Bendungan Nakasato (Sosrodarsono, & Takeda. 1977).....	53

Gambar 3.22. Geometri dan properti tanah Bendungan Nakasato disederhanakan (1 material)	54
Gambar 3.23. Geometri dan properti tanah Bendungan Nakasato disederhanakan (2 material)	54
Gambar 4.1. a. fully slow drawdown; b. transient drawdown; c. fully rapid drawdown	58
Gambar 4.2. Pemodelan kondisi pertama (SLOPE/W)	61
Gambar 4.3. Nilai Faktor Keamanan kondisi pertama (SLOPE/W)	61
Gambar 4.4. Pemodelan kondisi pertama (SLOPE/W)	62
Gambar 4.5. Nilai Faktor Keamanan kondisi kedua (SLOPE/W)	62
Gambar 4.6. Pemodelan kondisi ketiga (SLOPE/W)	63
Gambar 4.7. Nilai Faktor Keamanan kondisi ketiga (SLOPE/W)	64
Gambar 4.8. Geometri dan properti tanah Bendungan Nakasato disederhanakan (1 material)	65
Gambar 4.9. Phreatic line dalam tubuh bendungan 1 material hasil SEEP/W	66
Gambar 4.10. Arah aliran air melalui drainage filter	66
Gambar 4.11. Phreatic line dalam tubuh bendungan 1 material kondisi transient (0-55 tahun)	67
Gambar 4.12. Phreatic line dalam tubuh bendungan 1 material pada waktu ke 55 tahun.....	67
Gambar 4.13. Nilai faktor keamanan bendungan 1 material pada saat waktu ke 55 tahun.....	67
Gambar 4.14. Grafik nilai FS bendungan 1 material tiap waktu peninjauan	68
Gambar 4.15. Grafik nilai faktor keamanan berdasarkan variasi kecepatan drawdown untuk bendungan 1 material.....	69
Gambar 4.16. Geometri dan properti tanah Bendungan Nakasato disederhanakan (2 material)	70
Gambar 4.17. Phreatic line dalam tubuh bendungan 2 material hasil SEEP/W	70
Gambar 4.18. Phreatic line dalam tubuh bendungan 2 material kondisi transient (0-55 tahun)	70
Gambar 4.19. Nilai faktor keamanan bendungan 2 material pada saat waktu ke 55 tahun.....	71
Gambar 4.20. Grafik nilai FS bendungan 2 material tiap waktu peninjauan	72
Gambar 4.21. Grafik nilai faktor keamanan berdasarkan variasi kecepatan drawdown untuk bendungan 1 material.....	73
Gambar 4.22. Grafik perbandingan nilai FS untuk kedua geometri bendungan	73
Gambar 4.23. Grafik perbandingan nilai FS untuk metode yang dilakukan	74
Gambar 4.24. Grafik faktor keamanan untuk variasi kecepatan drawdown	77

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Nilai koefisien permeabilitas untuk beberapa jenis tanah (Muni Budhu, 2007)	19
Tabel 3.1. Properti tanah Bendungan Nakasato (Suyono, & Takeda. 1977).....	34
Tabel 3.2. Properti tanah bendungan (1 material).....	42
Tabel 3.3. Properti tanah bendungan (2 material).....	43
Tabel 3.4. Properti tanah pada database SEEP/W	45
Tabel 4.1. Parameter material pemodelan	60
Tabel 4.2. Nilai faktor keamanan untuk tiap kondisi pemodelan (SLOPE/W).....	64
Tabel 4.3. Nilai FS bendungan 1 material untuk tiap waktu peninjauan	68
Tabel 4.4. Nilai FS bendungan 1 material untuk tiap variasi kecepatan drawdown	69
Tabel 4.5. Nilai FS bendungan 2 material untuk tiap waktu peninjauan	71
Tabel 4.6. Nilai FS bendungan 2 material untuk tiap variasi kecepatan drawdown	72
Tabel 4.7. Perbandingan nilai FS untuk SLOPE/W dan SLOPE/W+SEEP/W	74
Tabel 4.8. Nilai tekanan air pori tertinggi pada tubuh bendungan sesuai variasi kecepatan drawdown	76
Tabel 4.9. Tabel nilai tekanan air pori tertinggi pada irisan bidang longsor dan nilai faktor keamanan untuk variasi kecepatan drawdown (bendungan 1 material).....	77
Tabel 4.10. Tabel nilai tekanan air pori tertinggi pada irisan bidang longsor dan nilai faktor keamanan untuk variasi kecepatan drawdown (bendungan 2 material).....	77

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang

Tumbuh dan berkembangnya peradaban manusia, serta kesadaran akan kebutuhan air di musim kemarau, membuat manusia menyadari perlunya menampung air di musim penghujan untuk cadangan air di kemudian hari, maka lahir dan berkembanglah teknik pembangunan bendungan.

Bendungan merupakan konstruksi yang dibangun untuk menahan laju air, kemudian mejadi waduk, danau, atau tempat rekreasi. Bendungan dapat dibuat dari beton, urugan, kayu, atau baja.

Dalam membangun bendungan urugan perlu diperhatikan faktor keamanan dari lereng bendungan tersebut. Kegagalan lereng pada bendungan urugan dapat mengakibatkan jebolnya bendungan tersebut, yang akan menimbulkan kerugian yang besar bagi kehidupan masyarakat.

Salah satu dari penyebab kegagalan lereng pada bendungan urugan adalah peristiwa *rapid drawdown* (penurunan muka air secara tiba-tiba), dimana terjadi penurunan muka air waduk secara cepat. *Rapid drawdown* dapat terjadi baik karena disengaja maupun tidak disengaja, misal : ketika pintu bangunan pelimpah bendungan (*spillway*) sengaja dibuka untuk mengatur tinggi muka air bendungan, ketika terjadi kebocoran pada tubuh bendungan, atau ketika curah hujan di daerah bendungan begitu tinggi sehingga muka air bendungan mengalami fluktuasi. Dalam mendesain ataupun menganalisa bendungan eksisting perlu dipertimbangkan kondisi *rapid drawdown*. Oleh sebab itu, perlu dilakukan penelitian mengenai kondisi lereng pada bendungan tanah tersebut untuk mengetahui nilai keamanan lereng bendungan pada kondisi *rapid drawdown*.

I.2. Permasalahan

Permasalahan serius pada saat merancang pembangunan suatu bendungan tanah adalah nilai faktor keamanan lereng bendungan tersebut. Salah satu faktor yang harus diperhitungkan dalam kestabilan lereng bendungan tanah adalah peristiwa *rapid drawdown*.

Penelitian ini menekankan kepada nilai faktor keamanan lereng bendungan pada kondisi kritis *rapid drawdown* yaitu ketika muka air sudah mencapai titik terendah namun tubuh bendungan masih dalam keadaan jenuh.

I.3. Ruang Lingkup Pembahasan

Penelitian tentang stabilitas lereng ini dibatasi hanya untuk meneliti nilai faktor keamanan bendungan tanah ketika terjadi penurunan muka air tiba-tiba (*rapid drawdown*).

Penelitian ini akan mensimulasikan lereng bendungan tanah/urugan pada peristiwa *rapid drawdown* secara 2 dimensi dengan bantuan perangkat lunak komputer GeoStudio 2004 :

1. SLOPE/W untuk mengetahui nilai faktor keamanan dari lereng bendungan tanah.
2. SEEP/W untuk mengetahui *phreatic line* pada tubuh bendungan sesuai dengan koefisien permeabilitas material bendungan.

Adapun data-data geometri dan properti tanah yang dipakai untuk simulasi berasal dari referensi (Sosrodarsono, & Takeda. 1977).

I.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah:

1. Untuk mengetahui faktor keamanan lereng bendungan tanah pada kondisi awal (bendungan baru dibangun).

2. Untuk mengetahui faktor keamanan lereng bendungan tanah pada kondisi air bendungan penuh.
3. Untuk mengetahui faktor keamanan lereng bendungan tanah pada simulasi kasus *rapid drawdown*.

I.5. Sistematika Penelitian

Metode penulisan dalam skripsi ini dibagi dalam empat bab, yaitu:

BAB I. PENDAHULUAN

Meliputi latar belakang penelitian, ruang lingkup pembahasan, tujuan penelitian dan sistematika yang dipakai dalam penulisan skripsi.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi pembahasan mengenai teori stabilitas lereng, tipe – tipe kelongsoran, metode analisa kestabilan lereng, serta metode analisa stabilitas lereng terhadap kasus *rapid drawdown*.

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Menjelaskan mengenai metodologi penelitian yang dilakukan berupa metode analisa dan parameter – parameter yang digunakan.

BAB IV. ANALISA HASIL PEMODELAN

Berisi proses dan analisa stabilitas lereng yang telah diperoleh dari hasil simulasi program komputer.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan dan saran dari hasil analisis yang telah diperoleh.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1. Bendungan Urugan

Suatu bendungan yang dibangun dengan cara menimbunkan bahan-bahan seperti : batu, krakal, kerikil, pasir dan tanah pada komposisi tertentu dengan fungsi sebagai pengangkat permukaan air yang terdapat di dalam waduk disebut bendungan urugan.

Didasarkan pada ukuran butiran dari bahan timbunan yang digunakan, secara umum dapat dibedakan 2 tipe bendungan urugan, yaitu :

1. Bendungan urugan batu (*rock fill dam*) dengan istilah “Bendungan batu”.
2. Bendungan urugan tanah (*earth fill dam*) dengan istilah “Bendungan tanah”.

Selain itu terdapat bendungan urugan campuran, yaitu terdiri dari timbunan batu di bagian hilirnya yang berfungsi sebagai penyangga, sedang bagian udiknya terdiri dari timbunan tanah yang disamping berfungsi sebagai penyangga tambahan, terutama berfungsi sebagai tirai kedap air.

II.2. Klasifikasi Bendungan Urugan

Ditinjau dari penempatan serta susunan bahan yang membentuk tubuh bendungan, maka bendungan urugan dapat digolongkan dalam tiga tipe utama, yaitu :

- Bendungan urugan homogen (bendungan homogen), apabila bahan yang membentuk tubuh bendungan terdiri dari tanah yang hampir sejenis dan gradasinya hampir seragam.
- Bendungan zonal, apabila timbunan yang membentuk tubuh bendungan terdiri dari batuan dengan gradasi yang berbeda-beda dalam urutan-urutan pelapisan tertentu. Pada bendungan ini penyangga

utama dibebankan kepada timbunan yang lulus air, sedangkan penahan rembesan dibebankan kepada timbunan yang kedap air. Type ini dibagi kedalam 3 jenis, yaitu :

- Bendungan tirai (*front care fill type dam*), dimana zona kedap air berada pada lereng udik bendungan tersebut.
- Bendungan inti miring (*inclined-core fill type dam*), dimana zona kedap airnya terletak di dalam tubuh bendungan dan berkedudukan miring kea rah hilir.
- Bendungan inti tegak (*central-core fill type dam*), yaitu zona kedap airnya terletak di dalam tubuh bendungan dengan kedudukan vertical, biasanya terletak di bidang tengah tubuh bendungan tersebut.
- Bendungan sekat, apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, teteapi dilengkapi dengan dinding tidak lulus air di lereng udiknya, yang biasanya terbuat dari lembaran baja tahan karat, lembaran beton bertulang, aspal beton, lembaran plastic, dll.

II.3. Karakteristik Bendungan Urugan

Bendungan urugan mempunyai kelebihan yaitu pembangunannya dapat dilaksanakan pada hampir semua kondisi geologi dan geografi yang dijumpai, selain itu bahan untuk tubuh bendungan dapat digunakan dari batuan yang terdapat disekitar lokasi bendungan. Namun, bendungan urugan mempunyai kelemahan, yaitu tidak mampu mengatasi limpasan di atas mercunya, dimana limpasan – limpasan yang terjadi dapat menyebabkan longsoran-longsoran pada lereng hilir yang dapat mengakibatkan jebolnya bendungan tersebut.

Beberapa karakteristik utama dari bendungan urugan, adalah sebagai berikut :

1. Bendungan urugan mempunyai alas yang luas, sehingga beban yang harus didukung oleh pondasi bendungan per satuan unit luas biasanya

Universitas Indonesia

kecil. Beban utama yang harus didukung oleh pondasi terdiri dari berat tubuh bendungan dan tekanan hidrostatik dari air dalam waduk. Karena hal itu, bendungan urugan dapat dibangun di atas batuan yang sudah lapuk atau di atas alur sungai yang tersusun dari batuan sedimen dengan kemampuan daya dukung yang rendah asalkan kekedapannya dapat diperbaiki pada tingkat yang dikehendaki.

2. Bendungan urugan selalu dapat dibangun dengan menggunakan bahan batuan yang terdapat di sekitar calon bendungan.
3. Dalam pembangunannya, bendungan urugan dapat dilaksanakan secara mekanis dengan intensitas yang tinggi.
4. Tubuh bendungan terdiri dari timbunan tanah atau timbunan batu yang berkomposisi lepas, maka bahaya jebolnya bendungan umumnya disebabkan oleh hal-hal berikut :
 - a. Longsoran yang terjadi baik pada lereng udik, maupun lereng hilir tubuh bendungan.
 - b. Terjadinya sufosi (erosi dalam) oleh gaya-gaya yang timbul dalam aliran filtrasi yang terjadi di dalam tubuh bendungan.
 - c. Suatu konstruksi yang kaku tidak diinginkan di dalam tubuh bendungan, karena konstruksi tersebut tak dapat mengikut gerakan konsolidasi dari tubuh bendungan tersebut.
 - d. Proses pembangunannya biasanya sangat pekat terhadap pengaruh iklim.

Beberapa aspek terpenting yang perlu dipelajari untuk dalam pembangunan bendungan adalah :

- Topografi.
- Geologi Teknik.
- Pondasi.
- Hidrologi.
- Bahan bendungan.

- Bangunan pelimpah.
- Bangunan penyadap.
- Lain-lain.

II.4. Lereng

Sebuah permukaan tanah yang terbuka dan berdiri membentuk sudut tertentu terhadap horizontal disebut lereng.

Lereng pada tanah maupun batuan terbentuk baik oleh alam maupun buatan manusia. Kekuatan alam seperti angin, air, pergerakan tanah, dll, dapat membentuk lereng alami. Pembangunan jalan, bendungan, dibuat oleh manusia dengan membentuk lereng pada permukaan tanah karena pembuatan lereng lebih ekonomis dibandingkan dengan membuat dinding penahan.

Kemungkinan terjadinya kelongsoran pada lereng alam dan lereng buatan selalu ada, dan dampaknya dapat berakibat kerugian materi dan non-materi kepada manusia. Karena itu analisa stabilitas suatu lereng merupakan hal yang penting untuk mencegah terjadinya bencana kegagalan lereng / kelongsoran.

II.5. Faktor – faktor yang Menyebabkan Kelongsoran Lereng

Telah disebutkan bahwa untuk mencapai kondisi stabil suatu lereng, kekuatan geser tanah harus lebih daripada tegangan geser yang bekerja pada lereng tersebut. Berdasarkan pernyataan tersebut, kondisi instabilitas lereng akan tercapai ketika kekuatan geser tanah menjadi lebih kecil dibandingkan tegangan gesernya, hal ini dapat terjadi apabila :

1. Berkurangnya kekuatan geser tanah pada lereng. Hal – hal yang mempengaruhi antara lain,
 - Bertambahnya tekanan air pori (mengurangi tegangan efektif). Naiknya muka air tanah, seringnya terjadi hujan, akan mempengaruhi tekanan air pori pada tanah yang akan

mengurangi tegangan efektif. Waktu yang dibutuhkan untuk perubahan tekanan air pori bergantung pada permeabilitas tanah tersebut.

- Keretakan (*Cracking*). Keretakan pada kepala/badan lereng sering terjadi akibat gaya tarik (*tension*) pada permukaan tanah yang melebihi kekuatan tariknya.
- Tanah yang mengembang/*Swelling*. Tanah lempung, terutama yang bersifat plastis mudah terjadi *Swelling* apabila terkena air.
- Berkurangnya sudut geser akibat gaya geser pada permukaan partikel. Partikel – partikel lempung yang berbentuk pipih akan cenderung tersusun secara paralel. Akibatnya permukaan tanah menjadi halus dan licin, hal ini akan mengurangi sudut geser tanah.
- Terjadinya rangkak (*creep*) akibat beban yang berkelanjutan. Tanah lempung, terutama tanah lempung dengan plastisitas tinggi akan berdeformasi apabila diberi beban yang berkelanjutan. Seiring berjalannya waktu, *Creep* dapat terjadi seiring dengan berjalannya waktu, secara jangka panjang hal ini akan menggerakkan tanah yang bertambah dari tahun ke tahun, dan hal ini dapat mengakibatkan kelongsoran lereng.
- *Leaching*, perubahan susunan kimia pada air, misalnya akibat pengaruh garam pada *marine clays*.
- Pelapukan / *Weathering*.
- *Cyclic Loading*. Pembebanan berulang yang dapat mengakibatkan ikatan antar partikel tanah terlepas dan tekanan air pori meningkat.

2. Bertambahnya tegangan geser tanah pada lereng tersebut.

- Beban pada puncak lereng.

- Tekanan air pada retakan di puncak lereng, apabila retak pada puncak lereng terisi oleh air, tekanan hidrostatis pada retakan akan membebani lereng, dan menambah tegangan geser.
- Bertambahnya berat tanah akibat meningkatnya kadar air. Infiltrasi air dan rembesan pada tanah lereng dapat menambah kadar air pada tanah, dan menambah beratnya.
- Penggalian pada dasar lereng. Penggalian pada dasar lereng yang membuat lereng menjadi semakin curam atau semakin tinggi akan menambah tegangan geser pada tanah dan mengurangi stabilitas. Erosi yang terjadi pada dasar lereng juga memiliki efek yang sama
- Berkurangnya muka air sampai ke dasar lereng secara cepat / tiba-tiba. Tekanan air yang bekerja pada bagian dasar lereng memberikan gaya yang menstabilisasi/menahan lereng. Apabila muka air turun, maka gaya tersebut akan berkurang dan tegangan geser tanah akan meningkat. Apabila hal ini terjadi secara cepat / tiba-tiba, dan tekanan air pori pada lereng tidak berkurang seiring dengan berkurangnya muka air, maka lereng menjadi tidak stabil. Kondisi ini disebut *rapid drawdown / sudden drawdown*, dan merupakan pertimbangan kondisi desain yang penting dalam membangun bendungan.
- Gempa bumi, menggetarkan tanah secara horizontal dan vertical yang mengakibatkan bertambahnya tegangan geser pada tanah melalui *cyclic loading*.

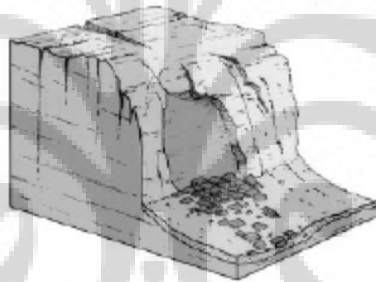
Seperti yang telah disebutkan, air memiliki peran yang sangat besar dalam proses pengurangan kekuatan tanah, selain itu air juga dapat menambah tegangan pada tanah. Tidak mengejutkan, apabila setiap kegagalan lereng selalu melibatkan kondisi air yang berubah.

II.6. Jenis – Jenis Kelongsoran Lereng

Secara umum longsor lereng terbagi menjadi 5 jenis, yaitu :

1. Longsor Jatuhan (*Falls*)

Umumnya terjadi pada tanah atau batuan, dimana permukaan bidang longsor tidak terbentuk. Tanah sering jatuh bila suatu material yang mudah tererosi terletak dibawah material yang lebih tahan erosi, seperti suatu lapisan pasir halus atau lempung terletak di bawah lapisan lempung terkonsolidasi berlebih. Jatuhan batuan dapat terjadi hampir pada semua tipe batuan dan umumnya disebabkan oleh pelapukan atau akibat pemotongan. Longsor jatuhan dipengaruhi oleh gravitasi bumi.

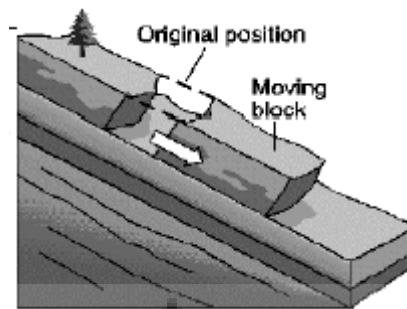


Gambar 2.1 Longsor Jatuhan

2. Longsor Translasi (*Translational slides*)

Longsor translasi terjadi sepanjang bidang dasar, patahan, retak atau celah (*fissures*) yang diperkirakan sejajar terhadap permukaan tanah, sehingga pergerakan tanah pada dasarnya adalah translasi.

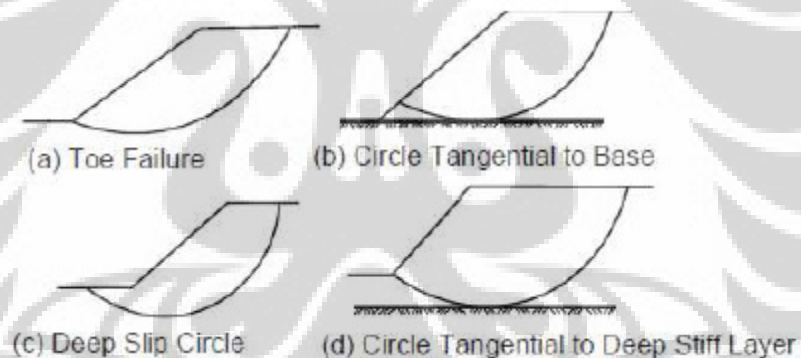
Keruntuhan translasi pada lempung yang berisi pasir atau lanau disebabkan oleh tekanan air pori yang tinggi dalam lapisan, khususnya bila lapisan yang turun melalui suatu penggalian. Longsor blok translasi (*translational block slides*) terjadi pada material massif sepanjang pertemuan lereng yang curam, dimana massa diatas lereng meluncur kebawah tanpa adanya gaya internal.



Gambar 2.2 Longsoran blok translasi

3. Longsoran Rotasi (*Rotational slides*)

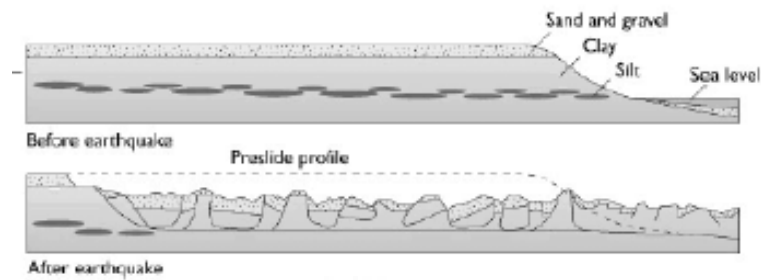
Dalam kelongsoran rotasi bentuk permukaan runtuh pada potongannya dapat berupa busur lingkaran atau kurva bukan lingkaran. Pada umumnya, kelongsoran lingkaran berhubungan dengan kondisi tanah yang homogen dan kelongsoran bukan lingkaran berhubungan dengan kondisi tanah tidak homogen (R.F. Craig, 1987).



Gambar 2.3 Longsoran blok rotasi

4. Longsoran Sebaran (*Spread*)

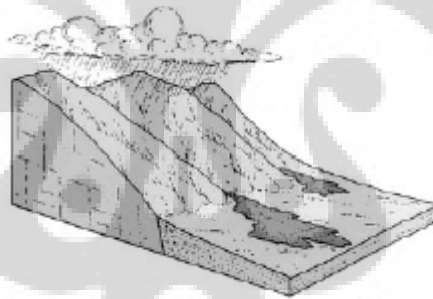
Ditandai dengan bentuk dan pergerakan yang tidak biasa. Sudut lereng yang kecil.



Gambar 2.4 Lateral Spreading

5. Longsoran Aliran (*Flows*)

Karakteristik dari longsoran aliran adalah material tidak massif, material bergerak ke bawah dan alirannya seperti suatu cairan yang kental (*Viscous fluid*). Longsoran aliran disebabkan karena terjadinya likufaksi terutama pada lapisan pasir halus lepas dan lanau, yang berada pada bagian bawah suatu lereng.



Gambar 2.5 Longsoran aliran

Kelongsoran yang terjadi dapat merupakan gabungan dari beberapa jenis kelongsoran.

II.7. Prinsip Teori Analisa Kestabilan Lereng

Dalam menghitung dan menganalisa kestabilan tanah atau lereng, ada beberapa parameter penting yang akan digunakan dalam perhitungan, yaitu :

1. Berat tanah
2. Kekuatan geser tanah
3. Tekanan air pori

Berat total massa tanah (W per satuan panjang) akan menentukan besar gaya yang menyebabkan ketidakstabilan pada lereng. Semakin berat massa tanah maka akan semakin besar kemungkinan untuk mengalami runtuh.

Kekuatan geser diperlukan untuk menghitung kestabilan tanah. Bila pada suatu titik pada sebuah bidang permukaan tanah memiliki tegangan geser yang sama dengan kekuatan gesernya maka akan terjadi keruntuhan pada titik tersebut.

Kekuatan geser tanah (τ_f) di suatu titik pada bidang tertentu menurut Coulumb adalah suatu fungsi linear terhadap tegangan normal (σ_f) pada bidang tersebut di titik yang sama, sebagai berikut :

$$\tau_f = c + \sigma_f \tan \Phi$$

dimana

τ_f = Kekuatan geser tanah

c = Parameter kekuatan geser (Nilai kohesi tanah)

Φ = Parameter kekuatan geser (Sudut geser tanah)

σ_f = Tegangan normal

Kekuatan geser tanah juga dapat dinyatakan sebagai fungsi dari tegangan normal efektif sebagai berikut :

$$\tau_f = c' + \sigma_f' \tan \Phi' = c' + (\sigma_f - u) \tan \Phi'$$

dimana

τ_f = Kekuatan geser tanah pada tegangan efektif

c' = Parameter kekuatan geser tegangan efektif (Nilai kohesi tanah)

Φ' = Parameter kekuatan geser tegangan efektif (Sudut geser tanah)

u = Tekanan air pori

σ_f' = Tegangan normal efektif

Dengan demikian maka keruntuhan akan terjadi pada titik yang mengalami keadaan kritis yang disebabkan oleh kombinasi antara tegangan geser dan tegangan normal efektif.

Bentuk permukaan runtuh yang mungkin terjadi dalam suatu longsor dapat berbeda-beda dan bervariasi sehingga dibutuhkan usaha untuk memprediksi secara matematik proses ketidakstabilan alami dan perkembangan ketidakstabilan tersebut.

Kestabilan dari suatu lereng dinyatakan oleh suatu besaran yang disebut sebagai nilai faktor keamanan (*factor of safety*). Faktor keamanan didefinisikan sebagai rasio kekuatan geser yang ada (τ_f) terhadap kekuatan geser yang minimum yang diperlukan untuk mempertahankan keseimbangan (τ_m).

$$F = \frac{\tau_f}{\tau_m}$$

Dimana :

F = Faktor keamanan

τ_f = Kekuatan geser yang ada (*Available shear strength of the soil*)

τ_m = Kekuatan geser minimum untuk mempertahankan keseimbangan.

Kondisinya sebagai berikut :

F > 1 Kondisi lereng stabil.

Fs = 1 Kondisi lereng dalam keadaan kritis.

Fs < 1 Kondisi lereng sangat rawan terhadap kelongsoran.

Prinsip ini kemudian dikembangkan oleh banyak ahli untuk penerapan yang lebih praktis, diantaranya metode konvensional, metode konvensional, Metode Bishop, metode Taylor, Metode Morgenstern, Metode Spencer, dan lain – lain.

II.8. Analisa dan Perhitungan untuk Stabilitas Tubuh Bendungan Urugan

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

- Analisa dan identifikasi terhadap gaya-gaya yang akan bekerja pada tubuh bendungan.
- Analisa dan perhitungan pada stabilitas lereng calon tubuh bendungan.
- Analisa dan perhitungan pada stabilitas calon tubuh bendungan terhadap gaya – gaya yang timbul oleh adanya aliran filtrasi di dalam tubuh bendungan tersebut.

Perincian dari ketiga hal diatas adalah sebagai berikut :

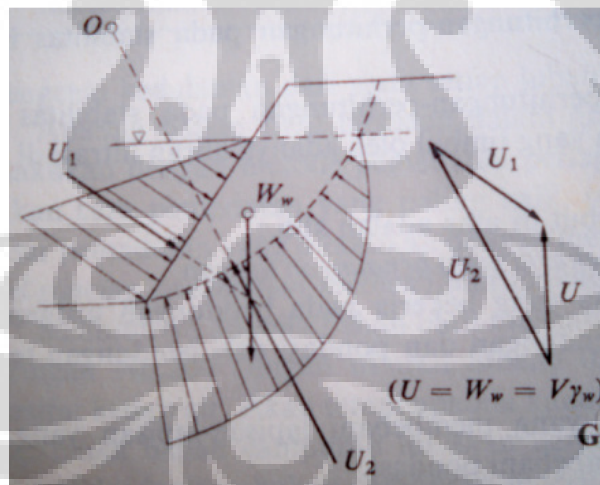
II.8.1. Gaya – Gaya yang Bekerja pada Bendungan Urugan

Gaya – gaya utama yang bekerja pada bendungan urugan akan mempengaruhi stabilitas tubuh bendungan dan pondasi bendungan, gaya – gaya tersebut antara lain :

- Berat tubuh bendungan itu sendiri, yang membebani lapisan tanah di bawah bendungan dan membebani pondasi. Untuk mengetahuinya diambil tiga kondisi yang tidak menguntungkan, yakni :
 1. Kondisi lembab segera sesudah tubuh bendungan selesai dibangun.
 2. Kondisi sesudah permukaan air waduk mencapai elevasi penuh, dimana bagian bendungan yang terletak di sebelah atas garis depresi dalam kondisi lembab, sedang bagian bendungan

yang terletak di sebelah bawah garis depresi dalam keadaan jenuh.

3. Kondisi dimana terjadi gejala penurunan mendadak (*rapid drawdown*) permukaan air waduk, sehingga semua bagian bendungan yang semula terletak disebelah bawah garis depresi dianggap jenuh.
- Tekanan hidrostatis yang akan membebani tubuh bendungan dan pondasinya, baik dari air yang terdapat di dalam waduk di udik bendungan maupun dari air di dalam sungai hilirnya. Pada perhitungan stabilitas tubuh bendungan dengan metode irisan, beban hidrostatis yang bekerja pada lereng udik bendungan dapat diambarkan dalam 3 cara pembebanan. Umumnya, berat bagian tubuh bendungan yang terletak di bawah garis depresi diperhitungkan sebagai berat bahan yang terletak dalam air.



Gambar 2.6 Skema pembebanan yang disebabkan oleh tekanan hidrostatis pada bidang lurus

- Tekanan air pori yang terkandung di antara butiran dari zona – zona tubuh bendungan. Gaya yang timbul dari tekanan air pori dianggap bekerja tegak lurus terhadap lingkaran bidang lurus. Kondisi yang

paling tidak menguntungkan dari gaya-gaya tersebut yang perlu diikutsertakan dalam perhitungan stabilitas tubuh bendungan adalah :

- Gaya yang timbul dari tekanan air pori dalam kondisi tubuh bendungan sedang dibangun.
- Gaya – gaya yang timbul dari tekanan air pori dalam keadaan waduk telah terisi penuh dan permukaan air sedang menurun secara berangsur – angsur

Apabila zona kedap air tubuh bendungan merupakan inti kedap air yang tipis, atau permeabilitasnya (koefisien permeabilitas – K) lebih besar dari 5×10^{-5} cm/dt, maka tekanan air porinya akan mendekati tekanan air yang sesuai dengan tingginya (tekanan gravitasi air). Pada kondisi ini batas tubuh bendungan yang jenuh mudah dapat diketahui dan udara yang terdapat di dalam daerah jenuh segera didesak oleh aliran filtrasi yang terjadi di dalam tubuh bendungan.

Akan tetapi, apabila zona kedap airnya tebal dengan $K \leq 1 \times 10^{-7}$ cm/dt, batas antara daerah yang jenuh dengan daerah tidak jenuh pada zona tersebut sukar diketahui, karena rendahnya nilai K, maka air filtrasi sukar mencapai lereng hilir. Dalam keadaan ini, faktor yang dominant yang menentukan besarnya tekanan air pori adalah jangkauan air kapiler yang mencapai sesuatu daerah di dalam zona kedap air tersebut, yang mungkin diakibatkan air hujan yang turun di atas tubuh bendungan dan meresap kedalam zona kedap air, atau bahkan penguapan – penguapan dari permukaan tanah yang kemudian terserap oleh zona ini.

Berdasarkan hal diatas, tekanan air pori dalam tubuh bendungan dapat diketahui dengan menggunakan jaringan trayektori aliran filtrasi (*flow-net*) dalam tubuh bendungan

dengan anggapan bahwa elevasi permukaan waduk dalam keadaan tetap.

- Gaya – gaya dari tekanan air pori yang timbul pada saat terjadinya penurunan mendadak permukaan air waduk (*rapid drawdown*). Pada saat terjadinya penurunan air waduk dengan mendadak, maka besarnya tekanan air pori yang masih tertinggal di dalam lapisan timbunan tubuh bendungan tergantung pada kecepatan penurunan tersebut dan pada permeabilitas bahan timbunan yang membentuk tubuh bendungan.

Berhubungan banyaknya jenis bahan-bahan tanah dan metode pelaksanaan timbunan yang berbeda-beda serta metode pengukuran permeabilitas yang bermacam-macam pula, maka amatlah sukar untuk mendapatkan harga koefisien filtrasi yang tepat.

Untuk memperoleh besarnya tekanan airpori dalam kondisi tersebut, hanya dapat dilakukan dengan pendekatan-pendekatan dan pertimbangan sebagai berikut :

- a. Tekanan air pori yang terdapat dalam tubuh bendungan, dianggap merupakan tekanan dari air pori yang belum sempat mengalir keluar dari pori-pori tanah bahan timbunan tubuh bendungan, walaupun terjadi penurunan muka air waduk.
- b. Tekanan air yang terdapat dalam tanah bahan timbunan tubuh bendungan sangat bervariasi, yang umumnya tergantung dari koefisien permeabilitas bahan tersebut. Akan tetapi bahan-bahan timbunan dengan harga $K = 1 \times 10^{-6}$ cm/s, biasanya air yang terdapat pada pori-pori bahan tersebut sangat sukar mengalir keluar dan dengan

demikian penurunan tekanan air porinyapun akan sukar pula.

c. Adalah suatu kenyataan, bahwa pada beberapa bahan tertentu, terjadi tekanan air pori yang besarnya melebihi tekanan gravitasi air yang terdapat di luar bendungan, terutama di daerah sebelah bawah lereng hilir (daerah tumit hilir) suatu bendungan tirai.

- Gaya – gaya seismis yang akan menimbulkan beban dinamika baik pada tubuh bendungan ataupun pondasinya.

Soil Type	$k_v(\text{cm/s})$
Clean Gravel	>1.0
Clean Sands, clean sand and gravel mixtures	$1.0 \text{ to } 10\text{E-}3$
Fine sands, silts, mixtures comprising sands, silts, and clays	$10\text{E-}3 \text{ to } 10\text{E-}7$
Homogeneous clays	$<10\text{E-}7$

Tabel 2.1 Nilai koefisien permeabilitas untuk beberapa jenis tanah (Muni Budhu, 2007)

II.8.2. Stabilitas Lereng Bendungan Urugan

Dalam pembangunan dan pelaksanaan suatu bendungan urugan, stabilitas lereng udik maupun lereng hilir merupakan kunci dari stabilitas tubuh bendungan secara keseluruhan.

Nilai faktor keamanan minimum dari konstruksi tubuh bendungan urugan adalah 1,2 atau lebih, sebagai syarat untuk diizinkan pembangunannya. (Sosrodarsono, & Takeda. 1976).

Beberapa kondisi yang dianggap paling tidak menguntungkan pada sebuah bendungan urugan adalah :

- 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 terisi setengah dan aliran air filtrasi dalam tubuh bendungan bersifat laminar.
- 4). Ketika permukaan air waduk berfluktuasi dengan intensitas yang besar, tetapi dalam periode yang pendek. Demikian pula pada saat terjadinya gejala penurunan mendadak permukaan air waduk dari elevasi permukaan penuh kepada elevasi permukaan terendah.
- 5). Pada waduk yang relative kecil, perlu pemeriksaan stabilitas tubuh bendungan pada saat kondisi permukaan air waduk melebihi elevasi permukaan penuhnya.
- 6). Pada bendungan urugan yang direncanakan untuk menampung banjir besar abnormal, maka stabilitas lereng bendungan perlu diperiksa pada elevasi permukaan tertinggi pada saat menampung volume banjir abnormal tersebut.

Dalam perhitungan – perhitungan stabilitas bendungan, diperlukan perbandingan dari beberapa alternative susunan tubuh bendungan dan kombinasi – kombinasi pembebanan sesuai dengan kondisi – kondisi di atas, sehingga didapat faktor keamanan $f \geq 1,2$.

Perhitungan stabilitas tubuh bendungan umumnya dilakukan dengan metode irisan bidang luncur bundar (*slice method on circular slip surface*).

$$F_s = \frac{\sum \{C.l + (N - U - Ne) \tan \phi\}}{\sum (T + Te)}$$

$$= \frac{\sum C.l + \sum \{\gamma.A(\cos \alpha - e.\sin \alpha) - V\} \tan \phi}{\sum \gamma.A(\sin \alpha + e.\cos \alpha)}$$

Dimana :

F_s : Faktor Keamanan

N : Beban komponen vertical dari berat setiap irisan bidang luncur
($= \gamma.A.\cos \alpha$)

Universitas Indonesia

T : Beban komponen tangensial dari berat setiap irisan bidang luncur

$$(= \gamma \cdot A \cdot \sin \alpha)$$

U : Tekanan air pori yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur.

N_e : Komponen vertical beban seismis yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur $(= e \cdot \gamma \cdot A \cdot \sin \alpha)$

T_e : Komponen tangensial beban seismis yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur $(= e \cdot \gamma \cdot A \cdot \cos \alpha)$

Φ : Sudut geser tanah yang membentuk dasar setiap irisan

C : Nilai kohesi tanah yang membentuk dasar setiap irisan

Z : Lebar setiap irisan bidang luncur

e : Intensitas seismis horizontal

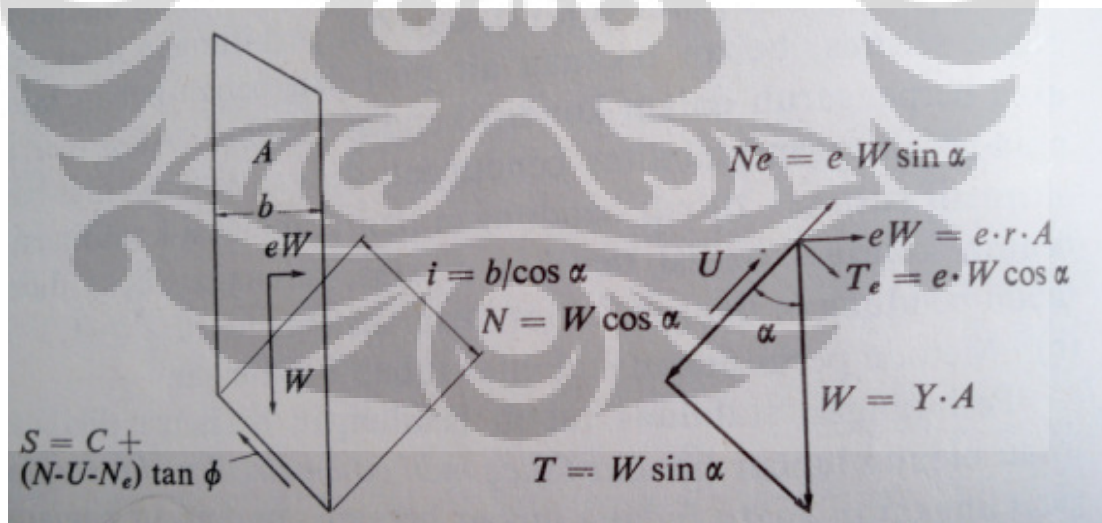
γ : Berat isi dari setiap bahan pembentuk irisan bidang luncur

A : Luas dari setiap bahan pembentuk irisan bidang luncur

α : Sudut kemiringan rata – rata dasar setiap irisan bidang luncur

V : Tekanan air pori

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2.7 Gaya – gaya pada irisan bidang luncur

II.8.3. Stabilitas Bendungan Terhadap Aliran Air Filtrasi

Bendungan dan pondasinya harus mampu mempertahankan kestabilannya terhadap gaya – gaya yang ditimbulkan oleh air filtrasi yang mengalir melalui celah – celah antara butiran – butiran tanah pembentuk tubuh dan pondasi bendungan.

Beberapa hal yang diperlukan untuk mengetahui kemampuan daya tahan tubuh bendungan akibat gaya filtrasi adalah :

1. Formasi garis depresi (*seepage line formation*) dalam tubuh bendungan dengan elevasi permukaan air tertentu yang direncanakan.
2. Kapasitas air filtrasi yang mengalir melalui tubuh dan pondasi bendungan.
3. Kemungkinan gejala *piping* yang disebabkan oleh gaya-gaya hidrodinamis dalam aliran air filtrasi.
4. Jaringan trayektori aliran filtrasi (*seepage flow-net*) dalam tubuh serta pondasi bendungan

II.9. Stabilitas Lereng Bendungan Tanah pada Kondisi Rapid Drawdown

Peristiwa penurunan muka air tiba – tiba (*rapid drawdown*) akan mengurangi mengurangi kestabilan dari lereng bendungan tanah yang dapat mengakibatkan keruntuhan lereng. Perlu diadakan perhitungan mengenai kestabilan lereng bendungan tanah terhadap peristiwa rapid drawdown. Berikut adalah beberapa teori untuk menganalisa stabilitas lereng bendungan tanah terhadap peristiwa *rapid drawdown* :

I. Pendekatan Suyono Sosrodarsono dan Kensaku Takeda

Sosrodarsono, dan Takeda (1976) menyatakan bahwa ketika terjadi peristiwa penurunan muka air tiba – tiba, besarnya tekanan tekanan air pori yang tertinggal di dalam tubuh bendungan tergantung pada kecepatan penurunan muka air dan permeabilitas bahan timbunan yang membentuk tubuh bendungan. Untuk mendapatkan nilai tekanan air pori yang tepat pada

Universitas Indonesia

tubuh bendungan ketika terjadi peristiwa rapid drawdown sangatlah sukar. Maka pendekatan – pendekatan yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Tekanan air pori yang terdapat dalam tubuh bendungan, dianggap merupakan tekanan dari air pori yang belum sempat mengalir keluar dari pori-pori tanah bahan timbunan tubuh bendungan, walaupun terjadi penurunan muka air waduk.
2. Tekanan air yang terdapat dalam tanah bahan timbunan tubuh bendungan sangat bervariasi, yang umumnya tergantung dari koefisien permeabilitas bahan tersebut. Akan tetapi bahan-bahan timbunan dengan harga $K = 1 \times 10^{-6}$ cm/s, biasanya air yang terdapat pada pori-pori bahan tersebut sangat sukar mengalir keluar dan dengan demikian penurunan tekanan air porinyapun akan sukar pula.

II. Metode Morgenstern untuk Analisa Kondisi Rapid Drawdown

Kondisi *Rapid Drawdown* merupakan kondisi yang harus dipertimbangkan dalam mendesain suatu bendungan urugan. Morgenstern (1963) mengembangkan metode untuk analisa kondisi *rapid drawdown* berdasarkan metode irisan dari Bishop dan Morgenstern. Tujuan dari metode ini adalah untuk menghitung nilai faktor keamanan selama terjadinya *rapid drawdown*, dimana nilai faktor keamanan berkurang selama tidak ada disipasi dari tekanan air pori. (Murthy, 2003)

Asumsi yang digunakan pada analisa dengan metode ini adalah :

1. Lereng sederhana dengan material homogen
2. Dasar bendungan memiliki sifat *impermeable*
3. Kondisi awal lereng terendam air
4. Tekanan air pori tidak terdisipasi selama *drawdown*

Morgenstern menggunakan parameter tekanan pori \bar{B} yang menyatakan,

$$\bar{B} = \frac{u}{\sigma_1}$$

Dimana $\sigma_1 = \gamma h$

γ = Total berat jenis tanah

h = Tinggi tanah diatas muka air setelah drawdown.

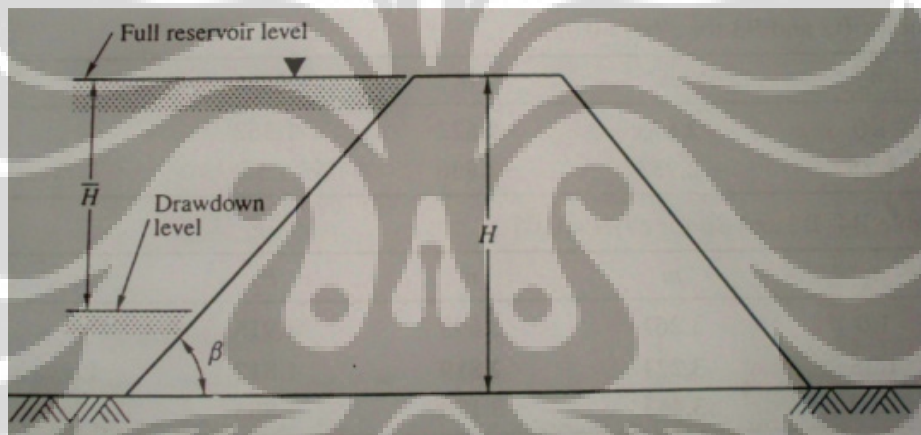
Rasio Drawdown adalah

$$R_d = \frac{\bar{H}}{H}$$

Dimana R_d = Rasio drawdown

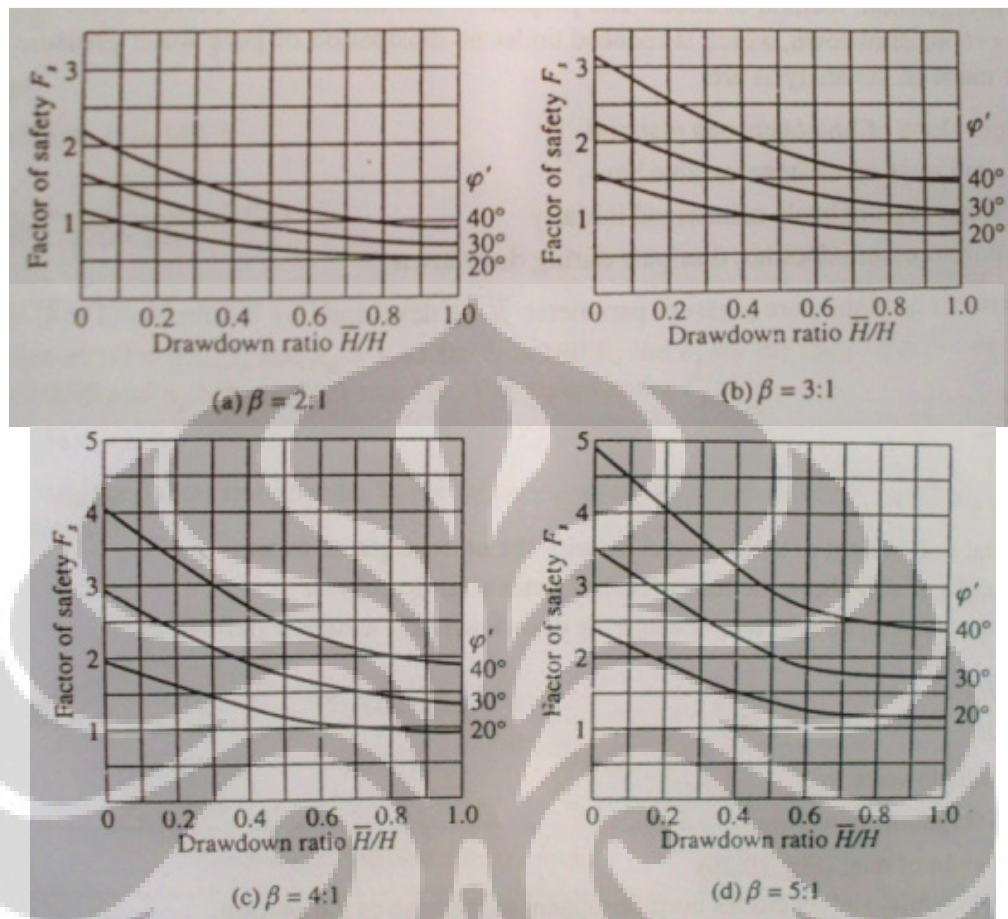
\bar{H} = Tinggi drawdown

H = Tinggi Bendungan (lihat pada gambar)

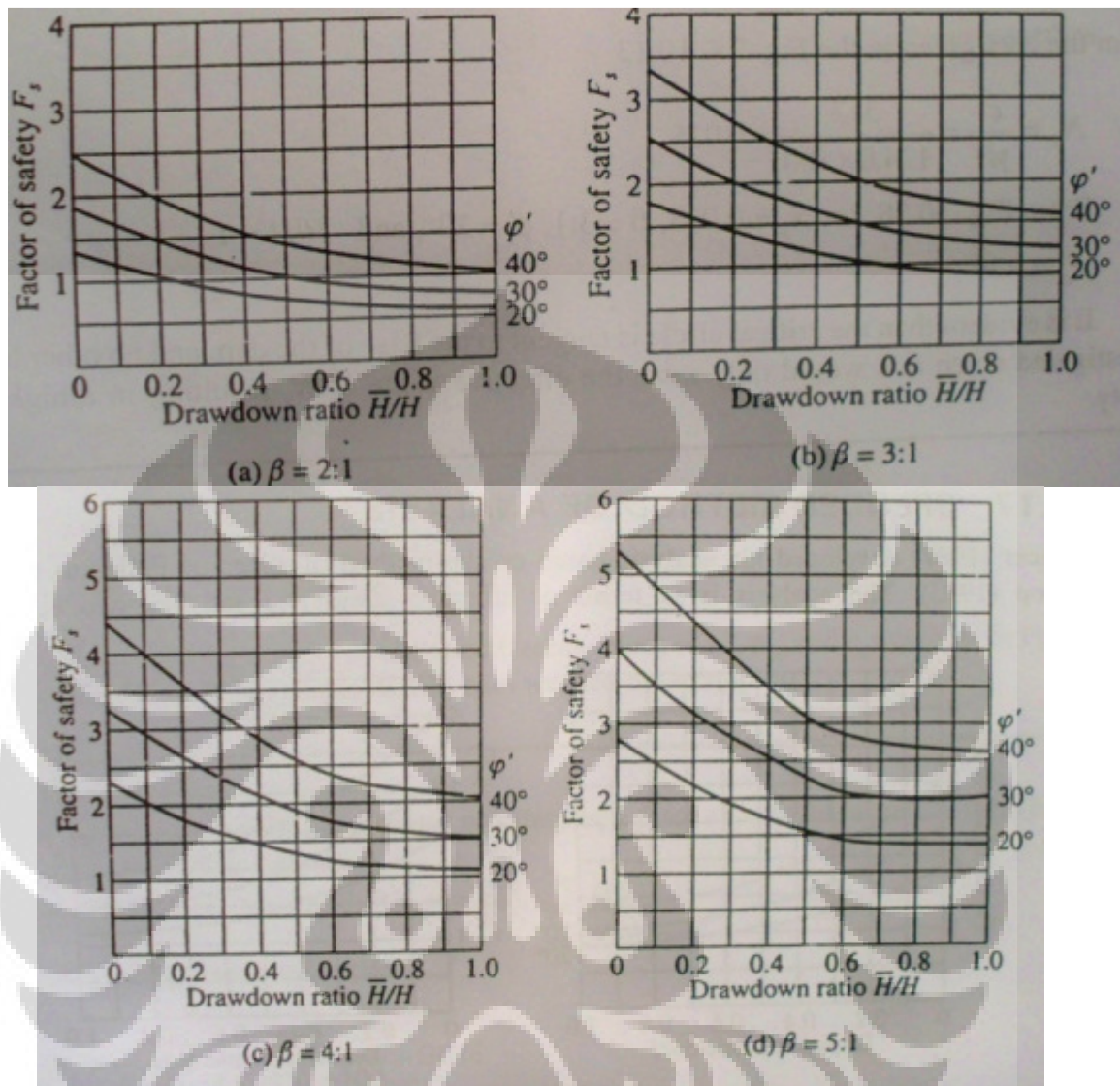


Gambar 2.8 Potongan bendungan untuk kondisi drawdown (Morgenstern,1963)

Dari grafik stabilitas, didapat nilai F_s lereng. Grafik meliputi nilai stabilitas untuk $c'/\gamma H$ dari 0.0125 sampai 0.050. Grafik dikembangkan untuk nilai Φ' 20° , 30° , 40° , untuk nilai β yang bervariasi.



Gambar 2.9 Grafik Stabilitas Drawdown untuk $c'/\gamma H = 0.0125$ (Morgenstern, 1963)



Gambar 2.10 Grafik Stabilitas Drawdown untuk $c'/\gamma H = 0.025$ (Morgenstern, 1963)

III. Analisa kestabilan lereng terhadap rapid drawdown (Duncan, & Wright, 2005)

Rapid drawdown terjadi ketika muka air pada lereng turun secara cepat dan air tidak sempat mengalir pada jenis tanah yang *impermeable*. Ketika muka air turun, gaya hidrostatis pada lereng bendungan hilang, kemudian tegangan geser pada keadaan seimbang menjadi meningkat.

Tanah dengan koefisien permeabilitas 10^{-4} cm/s atau lebih dapat diasumsikan dalam kondisi *drained* dalam analisa.

Stabilitas lereng untuk kondisi setelah rapid drawdown dapat dianalisa dengan 2 cara (Duncan, and Wright. 2005) :

1. Metode tegangan efektif

Kelebihan dari metode ini adalah kemudahannya dalam mendapatkan nilai parameter kekuatan geser tanah yang dibutuhkan. Parameter kekuatan geser efektif tanah dapat ditentukan dengan test triaxial *isotropically consolidated undrained (IC-U)*. Kekurangan dari metode ini adalah sulitnya mengukur nilai tekanan air pori pada terjadi pada tanah dengan permeabilitas yang rendah selama penurunan air terjadi. Perubahan tekanan air pori selama drawdown bergantung pada perubahan tegangan akibat perubahan beban air pada lereng, dan perilaku tanah *undrained* akibat perubahan gaya – gaya tersebut. Metode tegangan efektif untuk analisa kestabilan lereng pada peristiwa rapid drawdown menggunakan asumsi Bishop (1954) , yang kemudian digunakan oleh Morgenstren (1963).

2. Metode tegangan total

Metode tegangan total didasarkan pada kekuatan geser *undrained* pada zona dengan permeabilitas rendah. Duncan (1990) menganjurkan analisa tiga tingkat (*three stage analysis*).

Analisa tingkat pertama meliputi analisa kestabilan lereng sebelum terjadinya *drawdown* ketika level muka air masih tinggi dan tekanan air pori dalam kondisi *steady state*. Baik tegangan normal efektif maupun tegangan geser sepanjang permukaan runtuh digunakan untuk menentukan kekuatan geser *undrained*.

Analisa tingkat kedua meliputi analisa kestabilan dari lereng setelah *drawdown* ketika level muka air rendah. Tegangan efektif normal dan

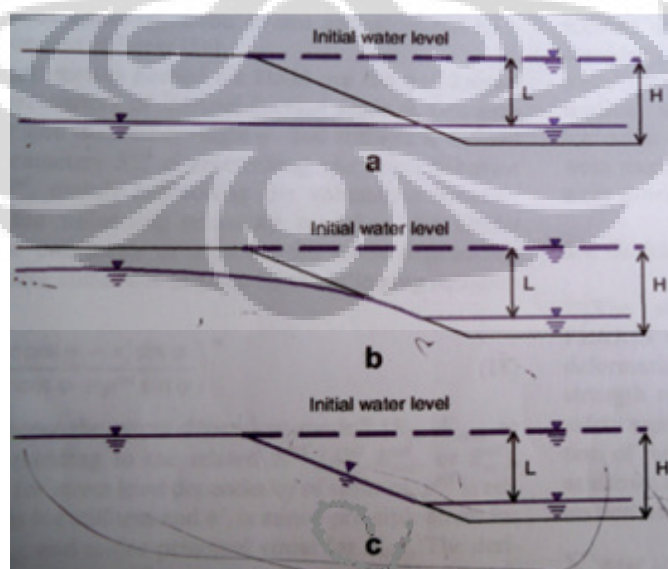
parameter geser efektif tanah, digunakan untuk menghitung kekuatan geser *drained* sepanjang permukaan runtuh.

Kekuatan geser *drained* dan *undrained* sepanjang permukaan runtuh kemudian dibandingkan, kekuatan geser yang lebih kecil akan digunakan untuk analisa tingkat ketiga.

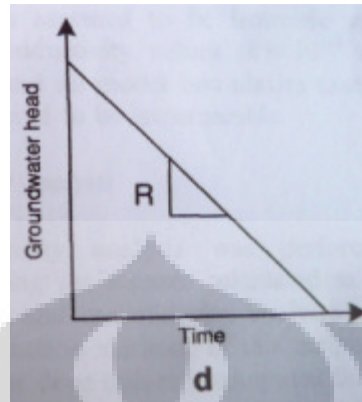
Analisa tingkat ketiga meliputi analisa stabilitas menggunakan kekuatan geser yang telah ditentukan untuk mengetahui nilai faktor keamanan pada level muka air pada kondisi akhir dari *rapid drawdown*.

IV. Stabilitas lereng pada kondisi rapid drawdown (Mehmet M. B., 2006)

Stabilitas lereng bergantung pada geometri lereng, property tanah, serta gaya – gaya yang bekerja pada lereng. Seiring dengan perubahan muka air, terjadi perubahan gaya – gaya pada lereng bendungan, tekanan air pori berlebih terdisipasi seiring waktu dan terjadi konsolidasi. Pada bendungan dengan permeabilitas yang rendah, tekanan air pori pada tubuh bendungan tidak terdisipasi bersamaan dengan kecepatan penurunan muka air, sehingga kondisi *undrained* pada tanah bendungan untuk kasus *rapid drawdown* berlaku.



Universitas Indonesia



Gambar 2.11 Garis *phreatic* setelah drawdown : a. *fully slow drawdown*; b. *transient drawdown*; c. *fully rapid drawdown*; d. *drawdown rate*.

Gambar diatas menunjukkan 3 kondisi penurunan muka air pada suatu lereng, pada kondisi (a), permukaan air turun secara perlahan – lahan atau disebut juga *fully slow drawdown*, dimana tekanan air pori berlebih mengalami disipasi bersamaan dengan turunnya muka air bendungan, pada kondisi ini tanah diasumsikan *drained*. Pada kondisi (c), permukaan air turun secara sangat cepat, tekanan air pori tidak sempat mengalami disipasi dan permukaan air telah mencapai titik terendah pada bendungan, kondisi (c) merupakan kondisi ekstrim dari *rapid drawdown*, karena tubuh bendungan dalam kondisi terberatnya, dan gaya – gaya hidrostatis pada lereng telah hilang dari lereng bendungan. Kondisi (b) menunjukkan terdapat perbedaan kecepatan penurunan muka air dengan disipasi tekanan air pori pada tubuh bendungan.

II.10. Uji Laboratorium Parameter Kuat Geser Tanah untuk Kondisi Rapid Drawdown

Untuk mengetahui nilai faktor keamanan pada suatu lereng tanah, perlu diketahui terlebih dahulu nilai parameter kuat gesernya, yaitu nilai kohesi (c) dan nilai sudut geser tanahnya (Φ). Parameter kuat geser tanah dapat diketahui dari uji coba triaxial. Untuk menganalisa lereng tanah pada

kondisi *rapid drawdown*, uji triaxial yang memenuhi adalah uji *Consolidated Undrained – CU*, (Holtz, & Kovacs, 1981).

Pada uji triaxial CU, tekanan axial diberikan pada sampel tanah secara bertahap. Volume sampel tidak boleh berubah selama pengujian berlangsung, sehingga ketika sampel tanah diberi tekanan axial dan sampel cenderung untuk berkontraksi akibat tekanan tersebut, terjadi terkanan air pori berlebih (Δu). Tekanan axial diberikan sampai sampel mengalami keruntuhan.

Test triaxial CU umum digunakan untuk menentukan nilai parameter geser tanah baik dalam kondisi tegangan total maupun tegangan efektif. Nilai parameter ini dapat digunakan untuk analisa kestabilan, dimana tanah sudah mengalami konsolidasi dan dalam kondisi setimbang dengan tegangan yang bekerja pada tanah tersebut, namun karena suatu sebab, tambahan tegangan bekerja pada tanah secara cepat, tsebelum terjadi aliran air pada tanah (*drainage*). Begitupun kondisi *rapid drawdown* pada bendungan tanah, bendungan yang telah lama di konstruksi dan beroperasi telah mengalami konsolidasi, namun karena suatu alasan tertentu (misal : bangunan pelimpah dibuka untuk mengatur ketinggian air, kebocoran pada tubuh bendungan, dsb) terjadi peristiwa *rapid drawdown* yang memberikan beban tambahan pada tubuh bendungan dan dapat mengakibatkan ketidakstabilan lereng bendungan tanah.

II.11. Teori Penggunaan Perangkat Lunak SLOPE/W

Slope/W merupakan *software* yang menggunakan teori *limit equilibrium* dalam menghitung factor keamanan dari suatu lereng. Formulasi yang komprehensif membuat software ini dapat menganalisis permasalahan – permasalahan yang berkaitan dengan stabilitas lereng, baik yang sederhana maupun yang rumit dengan menggunakan berbagai macam metode perhitungan factor keamanan.

Slope/W menyediakan berbagai macam metode perhitungan factor keamanan yang dapat dipilih, diantaranya yaitu metode *Ordinary* (Fellenius), *Bishop Simplified*, *Janbu Simplified*, *Spencer method*. Penghitungan yang dijalankan merupakan suatu analisis probabilistik terhadap stabilitas lereng yang bergantung pada beberapa variable yang berkaitan dengan parameter inputnya. Variable – variable tersebut merupakan parameter material yang berbeda – beda untuk setiap kasus, misalnya kohesi dan sudut geser, berat jenis, kondisi tekanan air pori, pembebanan, dan lain-lain. Slope/W dapat dipadukan dengan penggunaan SEEP/W untuk mengetahui letak muka air pada suatu bendungan yang mendekati kondisi realistis.

II.12. Teori Penggunaan Perangkat Lunak SEEP/W

SEEP/W merupakan perangkat lunak berbasis elemen hingga (*finite elemeni*) yang dapat digunakan untuk menganalisa aliran air pada suatu material berporos seperti tanah atau batuan. Perangkat lunak SEEP/W dapat memodelkan baik aliran *saturated* ataupun *unsaturated*. SEEP/W memungkinkan untuk melakukan analisa aliran air sebagai fungsi waktu (*transient*). Melalui perangkat lunak SEEP/W, pengguna dapat mengetahui garis *phreatic line* pada tubuh material sesuai dengan koefisien permeabilitas material tersebut

II.12.1. Muka air (*Water Head*)

Menurut prinsip Bernoulli, *Total Head* (H) merupakan :

$$H = h_z + h_p + v^2/2g$$

Dimana :

h_z = tinggi elevasi

h_p = tinggi tekanan

$v^2/2g$ = *velocity head*

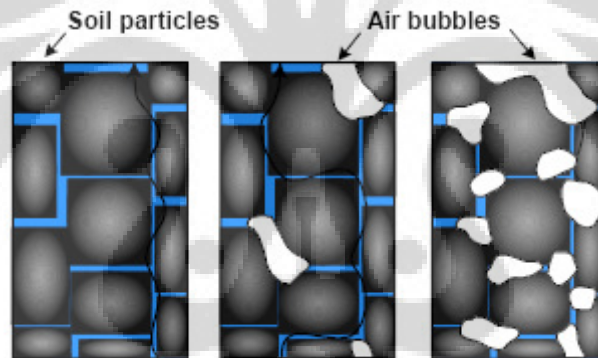
nilai *velocity head* secara umum bernilai kecil ($<1\text{cm/s}$) maka dari itu dapat diabaikan. Sehingga *Total Head* (H) pada tanah merupakan :

$$H = h_z + h_p$$

II.12.2. Koefisien Permeabilitas

Koefisien permeabilitas merupakan properti tanah yang menunjukkan kemampuan tanah untuk meloloskan air melalui pori-porinya.

Pada kondisi tanah jenuh, rongga-rongga pada tanah terisi semua oleh air. Ketika kondisi tanah berubah menjadi tidak jenuh, maka rongga pada tanah mulai terisi udara sehingga mengakibatkan kemampuan tanah untuk meloloskan air menjadi berkurang. Pada saat tekanan air pori menjadi semakin negative, semakin banyak pula rongga pada tanah yang terisi udara dan koefisien permeabilitas menjadi berkurang.



Gambar 2.12 Ilustrasi aliran air pada tanah dari kondisi jenuh ke kondisi tidak jenuh (SEEP/W Manual, 2004)

Melalui penjelasan ini, cukup jelas bahwa kemampuan air untuk mengalir melalui tanah bergantung pada banyaknya jumlah air pada rongga tanah tersebut, sehingga koefisien permeabilitas pada suatu tanah membentuk suatu fungsi koefisien permeabilitas.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

III.1. Pemilihan Kasus

Analisa mengenai peristiwa *rapid drawdown* pada bendungan tanah perlu dilakukan karena nilai faktor keamanan lereng bendungan akan berkurang, sehingga dapat terjadi kelongsoran pada lereng bendungan. Pada bendungan yang memiliki permeabilitas rendah, tekanan air pori di dalam tubuh bendungan tidak terdisipasi seiring dengan turunnya muka air yang dibendung. Akibat turunnya muka air secara cepat / tiba-tiba, gaya hidrostatis yang menahan lereng bendungan hilang, namun tekanan air pori dalam tubuh bendungan masih tinggi, sehingga akan mengganggu kestabilan lereng bendungan.

Pada penelitian ini, penulis akan menganalisis perubahan nilai faktor keamanan yang terjadi pada lereng Bendungan Nakasato akibat peristiwa *rapid drawdown*.

Dalam penelitian ini, penulis akan mengamati nilai faktor keamanan untuk variasi kondisi bendungan, yaitu :

- Kondisi pada saat bendungan selesai dibangun.
- Kondisi pada saat ketinggian air 33 meter dari dasar bendungan (bendungan penuh).
- Kondisi pada saat terjadi *rapid drawdown*.

Data geometri serta properti tanah yang digunakan bersumber dari referensi (Sosrodarsono, & Takeda. 1977). Metode penelitian dilakukan dengan bantuan perangkat lunak SLOPE/W dan SEEP/W yang merupakan bagian dari perangkat lunak GeoStudio 2004 (Version 6.02), GEO-SLOPE International, Ltd.

Analisa dalam penelitian ini dibagi menjadi kedalam 2 bagian, yaitu : analisa faktor keamanan bendungan pada saat *rapid drawdown* hanya dengan

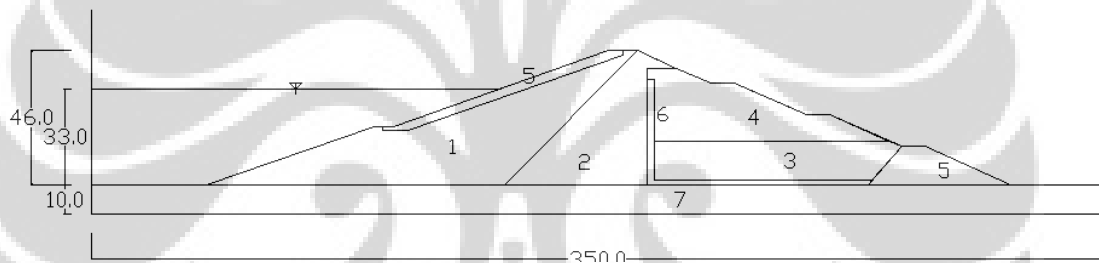
menggunakan software SLOPE/W, dan analisa faktor keamanan bendungan pada saat *rapid drawdown* dengan software SLOPE/W + SEEP/W (dengan kondisi muka air pada tubuh bendungan berdasarkan SEEP/W).

III.2. Pemodelan dengan SLOPE/W

Pemodelan dengan SLOPE/W akan dilakukan pada geometri dan properti asli material Bendungan Nakasato berdasarkan referensi (Sosrodarsono, & Takeda. 1977)

III.2.1. Geometri dan properti bendungan

Berikut adalah properti tanah dan geometri Bendungan Nakasato :



Gambar 3.1 Geometri Bendungan Nakasato (Sosrodarsono, & Takeda. 1977)

No	Zona	Y (KN/m3)	Ysat (KN/m3)	c (KN/m2)	ϕ	Koefisien Filtrasi (cm/dtk)
1	Zona Kedap Air 1	20.9	21.1	60	19	5.00E-06
2	Zona Kedap Air 2	20.9	21.1	30	25	5.00E-05
3	Zona Sembarang 1	20.9	21.1	30	32	5.00E-04
4	Zona Sembarang 2	18	19	10	25	1.00E-04
5	Zona timbunan batu	18	21	0	35	1.00E-02
6	Drainage Filter	20	22	0	30	5.00E-03
7	Alas Kedap Air	18	19	50	15	5.00E-06

Tabel 3.1 Properti tanah Bendungan Nakasato (Suyono, & Takeda. 1977)

III.2.2. Tahapan dalam menggunakan software SLOPE/W

Tahapan – tahapan yang dilakukan pada program SLOPE/W dalam menjalankan pemodelan untuk *rapid drawdown* adalah sebagai berikut :

1. INPUT

- Pengaturan umum, berupa penentuan ukuran halaman, skala, grid dan axis
- Menentukan titik – titik untuk membentuk geometri pemodelan
- Menentukan properti material tanah yang digunakan
- Menggambar garis berikut properti tanah sesuai dengan pemodelan yang diinginkan
- Menentukan garis tekanan air pori pada geometri yang telah dibuat
- Menentukan *Slip surface grid*, *Slip surface radius*, dan *Slip surface limit*
- Menentukan jenis analisa yang digunakan

2. CALCULATION

- Verifikasi input
- Melakukan proses perhitungan (*solve*).

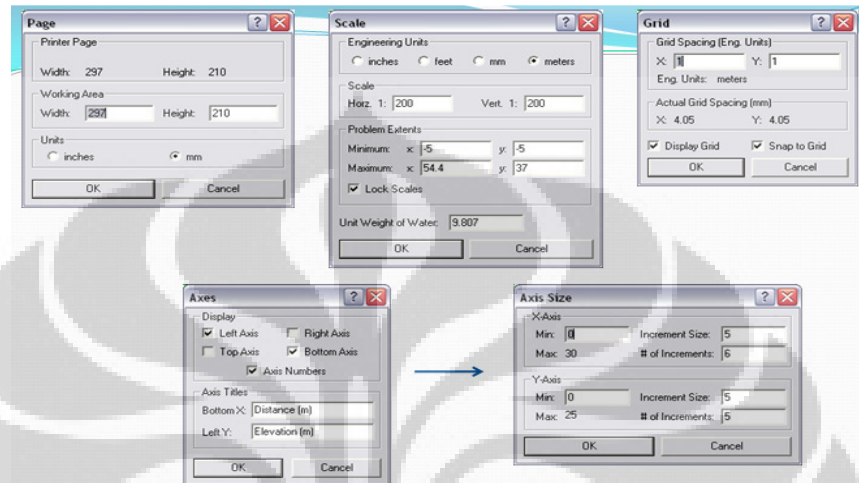
3. OUTPUT

- Hasil perhitungan berupa gambar daerah keruntuhan dan nilai faktor keamanan pada lereng yang diamati.

Berikut adalah gambaran prosedur untuk perhitungan Safety Factor (FS) Kelongsoran Lereng menggunakan GeoSlope SLOPE/W

a. Prosedur Analisa

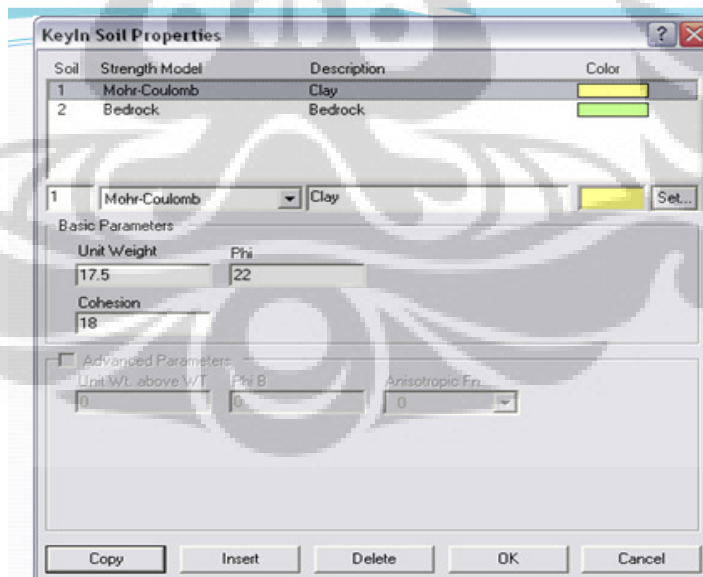
- Mengatur ukuran kertas, skala, grid, dan axes.



Menu Set → Page / Scale / Grid / Axes

Gambar 3.2 Pengaturan Awal Pada SLOPE/W

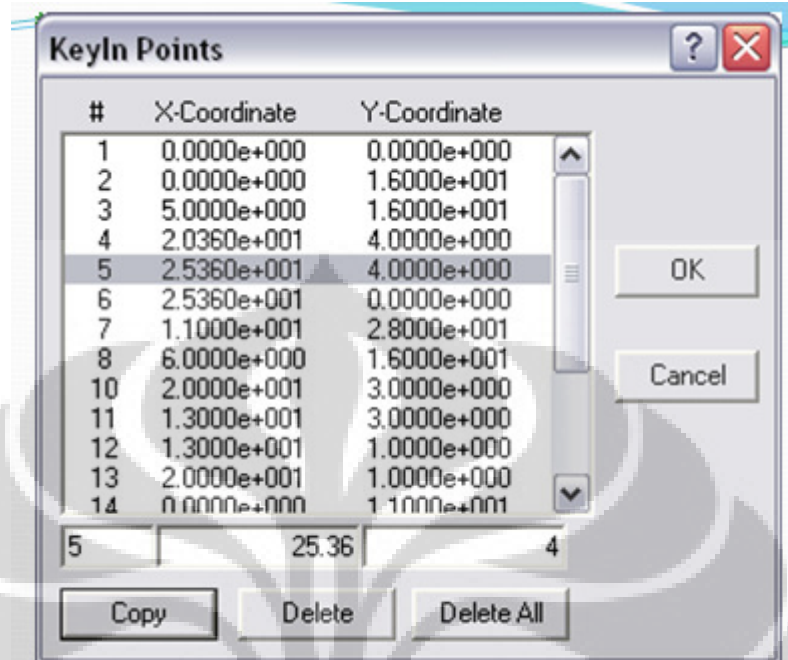
- Memasukkan properti-properti tanah pada tiap lapisan.



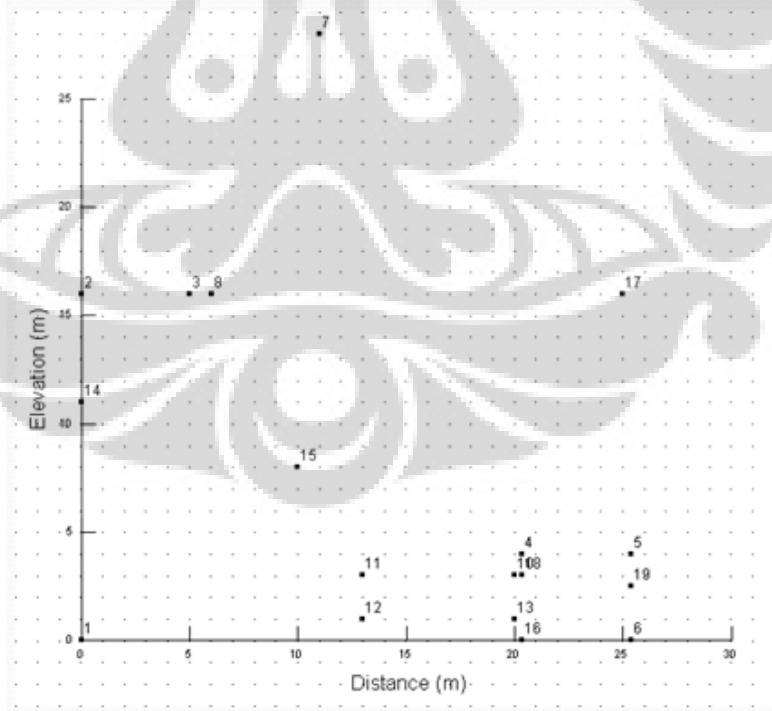
Menu KeyIn → Soil Properties

Gambar 3.3 Penentuan Properti Tanah Pada SLOPE/W

- Menentukan titik – titik acuan

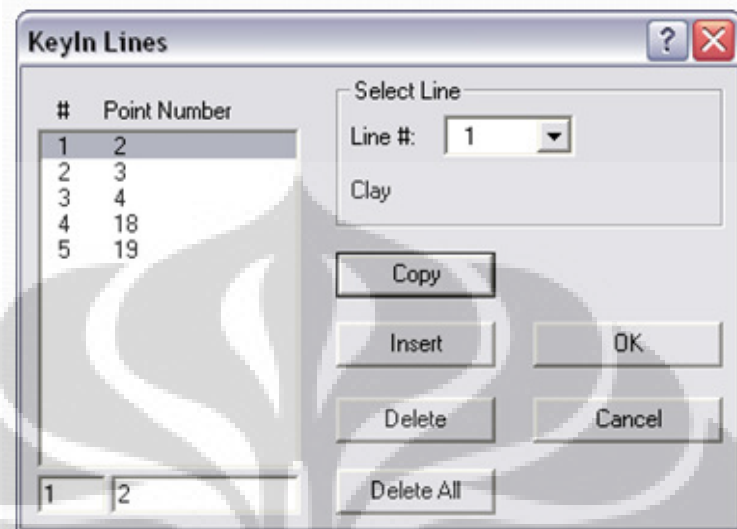


Gambar 3.4 Penentuan Titik - titik Acuan Pada SLOPE/W



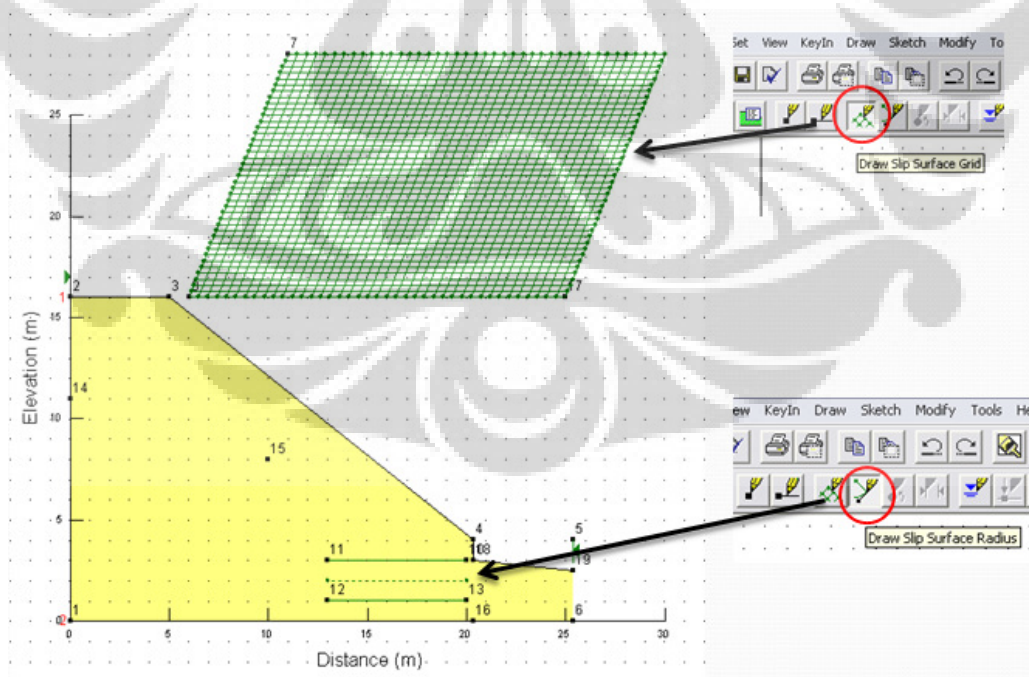
Gambar 3.5 Menggambarkan Geometri Lereng Pada SLOPE/W

- Menarik garis (*line*) yang menghubungkan titik – titik tersebut untuk membentuk lapisan tanah



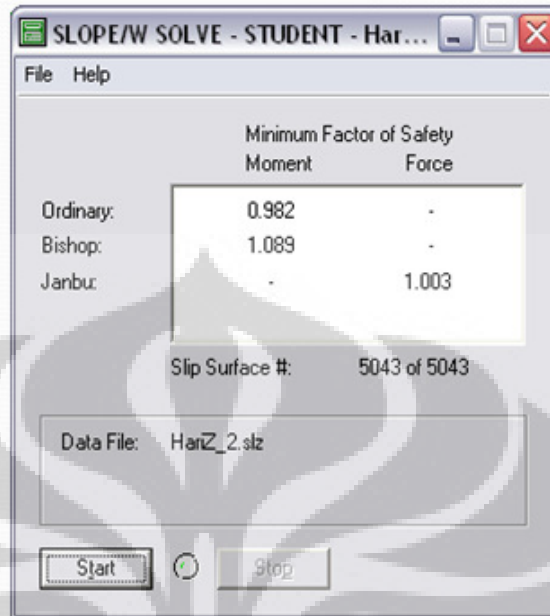
Gambar 3.6 Menggambar Garis Pada SLOPE/W

- Membuat grid (berupa matriks) dan radius untuk menentukan iterasi



Gambar 3.7 Grid Dan Radius Keruntuhan

- Menunjukkan safety factor minimum yang terjadi



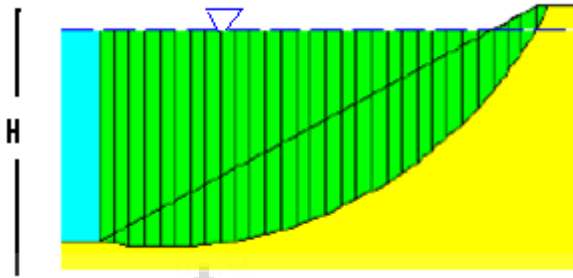
Gambar 3.8 Faktor Keamanan Sebagai Output SLOPE/W

III.2.3. Metode Pemodelan Rapid Drawdown dengan SLOPE/W

Untuk melakukan simulasi kondisi *rapid drawdown* pada suatu bendungan urugan dengan menggunakan program SLOPE/W, perlu dilakukan pendekatan kondisi bendungan yang sesuai dengan kondisi di lapangan. Selama terjadi *rapid drawdown*, efek stabilisasi lereng dari gaya hidrostatis air menjadi lenyap, namun tekanan air pori di dalam tubuh bendungan urugan masih tinggi. Sehingga, stabilitas dari kondisi udik bendungan dapat sangat berkurang, nilai faktor keamanan lereng pun berkurang. Seiring dengan berjalannya waktu, tekanan air pori dalam tubuh bendungan akan berkurang, hal ini sangat dipengaruhi oleh permeabilitas dari material urugan.

Dalam penelitian kali ini, pendekatan yang dilakukan dalam memodelkan bendungan ketika terjadi peristiwa *rapid drawdown* adalah pendekatan kekuatan efektif.

Untuk memodelkan beban air yang bekerja pada lereng bendungan, digunakan model material tanpa kekuatan (*no strength*) dengan berat jenis air.



Gambar 3.9. Ilustrasi kondisi pada saat air penuh.

Tegangan efektif yang bekerja adalah :

$$\sigma'_v = \sigma - u$$

$$\sigma'_v = (H_s \gamma_s + H_w \gamma_w) - (H_s + H_w) \gamma_w$$

$$\sigma'_v = H_s (\gamma_s - \gamma_w)$$

Untuk mendapatkan kondisi *rapid drawdown*, penulis akan menghilangkan material air yang membebani lereng bendungan, dan mengubah garis tekanan air (*piezometric line*) sehingga tepat berada pada permukaan bendungan. Dengan melakukan hal ini, gaya hidrostatis yang diberikan pada lereng bendungan akan hilang, namun tegangan efektif akan tetap sama pada tiap irisan keruntuhan.

$$\begin{aligned}\sigma'_v &= \sigma - u \\ \sigma'_v &= H_s \gamma_s - H_w \gamma_w \\ H_w &= H_s, \therefore \\ \sigma'_v &= H_s (\gamma_s - \gamma_w)\end{aligned}$$



Gambar 3.10. Ilustrasi kondisi pada saat *rapid drawdown*.

Secara praktis, kondisi ini memang tidak mungkin terjadi, dimana air dapat lenyap begitu saja, tanpa adanya perubahan tekanan air pori sedikitpun pada tubuh bendungan ketika terjadi *rapid drawdown*. Namun, kondisi ini merupakan kondisi yang paling buruk dalam peristiwa *rapid drawdown*.

III.3. Pemodelan dengan SEEP/W

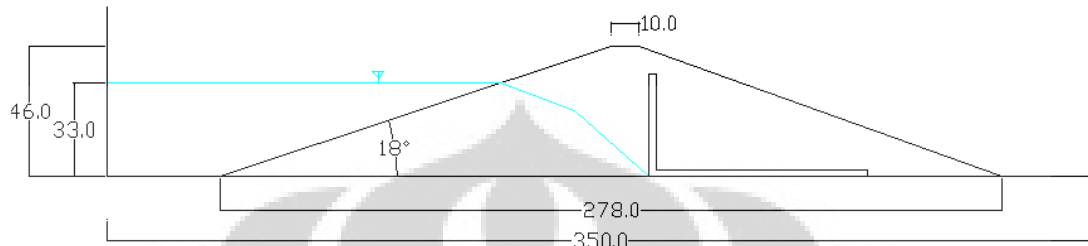
Tujuan dari penggunaan software SEEP/W ini adalah untuk mengetahui garis muka air (*phreatic line*) dalam Bendungan Nakasato ketika yang memiliki koefisien permeabilitas tertentu, pada kondisi *rapid drawdown*.

III.3.1. Geometri dan properti bendungan

Berdasarkan geometri asli Bendungan Nakasato yang berasal dari referensi (Sosrodarsono, & Takeda. 1977), terdapat 8 zona bendungan yang memiliki properti yang berbeda-beda. Untuk memudahkan dalam memodelkan dalam software SEEP/W, maka geometri asli Bendungan Nakasato akan disederhanakan menjadi 2 bentuk tanpa mengabaikan geometri

dan properti aslinya, yaitu kedalam bentuk geometri 1 jenis material, dan bentuk geometri 2 material, sebagai berikut :

I. 1 jenis Material



Gambar 3.11. Geometri Nakasato yang telah disederhanakan (1 material)

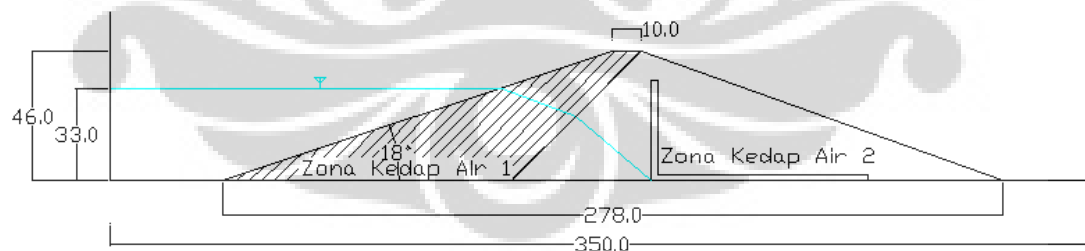
Properti tanah yang digunakan adalah sebagai berikut :

	Soil Model	Y (KN/m ³)	Ysat (KN/m ³)	C (KN/m ²)	ϕ	Koefisien Filtrasi (cm/dtk)	Koefisien Filtrasi m/day
Dam Fill	Mohr-Couloumb	20.9	21.1	45	22	5.00E-06	4.32E-03
Drainage Filter	Mohr-Couloumb	20	22	0	30	5.00E-03	4.32

Tabel 3.2. Properti tanah bendungan (1 material)

Properti tanah yang digunakan merupakan gabungan dari properti tanah utama yang menyusun tubuh bendungan, yaitu zona kedap air 1 dan 2. Pemilihan properti material gabungan ini berdasarkan sisi udik bendungan yang ditinjau faktor keamanannya pada saat terjadi *rapid drawdown*

II. 2 jenis Material



Gambar 3.12. Geometri Nakasato yang telah disederhanakan (2 material)

Properti tanah yang digunakan adalah sebagai berikut :

	Soil Model	Y (KN/m ³)	Ysat (KN/m ³)	C (KN/m ²)	φ	Koefisien Filtrasi (cm/dtk)	Koefisien Filtrasi m/day
Zona Kedap Air 1	Mohr-Couloumb	20.9	21.1	60	19	5.00E-06	4.32E-03
Zona Kedap Air 2	Mohr-Couloumb	20.9	21.1	30	25	5.00E-05	4.32E-02
Drainage Filter	Mohr-Couloumb	20	22	0	30	5.00E-03	4.32

Tabel 3.3. Properti tanah bendungan (2 material)

Properti tanah yang digunakan tidak merubah properti dari kondisi asli namun hanya menghilangkan zona timbunan batu pada sisi udik bendungan, zona sembarang 1, dan zona sembarang 2, hal ini mempertimbangkan bahwa hanya daerah udik bendungan saja yang ditinjau keamanan lerengnya.

Dari kedua geometri diatas yang kemudian akan dimodelkan dalam SEEP/W, akan didapat hasil berupa *phreatic line*, yaitu muka air pada tubuh bendungan sesuai dengan koefisien permeabilitas masing-masing material.

III.3.2. Tahapan dalam menggunakan software SEEP/W

Secara umum, penggunaan software SEEP/W terbagi kedalam dua kondisi, yaitu kondisi *Steady-state* dan kondisi *transient*. Untuk melakukan pemodelan kondisi *transient*, diperlukan pemodelan kondisi *steady-state* terlebih dahulu sebagai kondisi awal (*initial condition*).

Tahapan – tahapan yang dilakukan pada program SEEP/W dalam menjalankan pemodelan untuk *rapid drawdown* adalah sebagai berikut :

1. INPUT

- Pengaturan umum, berupa penentuan ukuran halaman, skala, grid dan axis.
- Menentukan jenis analisa yang digunakan (*steady-state* atau *transient*).

Untuk kondisi *transient*, kondisi awal dan *time step* pada perhitungan harus ditentukan.

- Menentukan titik – titik untuk membentuk geometri pemodelan.
- Menentukan properti material tanah yang digunakan.

- Menggambar garis berikut properti tanah sesuai dengan pemodelan yang diinginkan.
- *Generate mesh.*
- Menentukan kondisi batas (*boundary condition*), yaitu tinggi kepala air (*water head*) dalam tiap nodal.

2. CALCULATION

- Verifikasi
- Melakukan proses perhitungan (*solve*).

3. OUTPUT

- Melakukan proses perhitungan (*solve*).
- Hasil perhitungan berupa garis *phreatic line* pada tubuh bendungan.

III.3.3. Metode Pemodelan kondisi Rapid Drawdown dengan SEEP/W

Kondisi *rapid drawdown* dalam bendungan merupakan kondisi dimana tinggi muka air pada bendungan turun secara cepat sebelum air dalam tubuh bendungan belum sempat terdisipasi akibat koefisien permeabilitas bendungan itu sendiri. Pemodelan dengan software SEEP/W dalam penelitian ini dilakukan dalam kondisi *transient*, dan kondisi *steady state* sebagai kondisi awalnya.

I. Pemodelan kondisi *steady state*

Kondisi *steady state* dalam pemodelan ini adalah kondisi dimana bendungan dalam kondisi penuh, muka air pada udik bendungan berada pada elevasi 33 meter dari dasar bendungan.

Untuk mendapatkan fungsi koefisien permeabilitas yang sesuai dengan kondisi aslinya tidaklah mudah. Untuk itu, digunakan fungsi koefisien permeabilitas yang telah disediakan dalam *database* software SEEP/W.

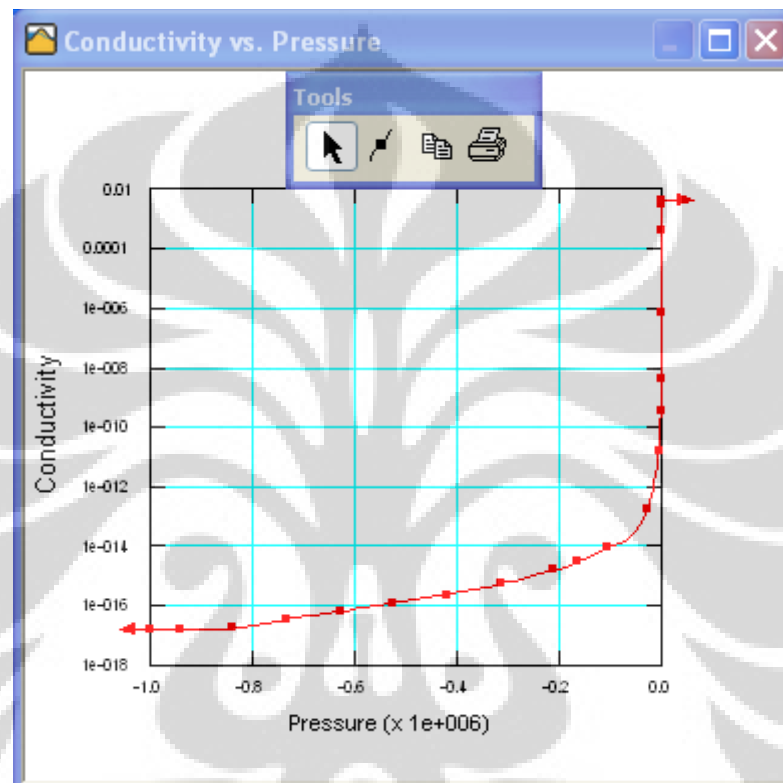
SEEP/W telah menyediakan fungsi koefisien permeabilitas untuk 24 jenis tanah yang berbeda koefisien permeabilitasnya. *Database* ini terdapat pada file “SEEP Database m-day-kPa-kN.gsz”

#	Soil Name	Ksat (m/s)
1	Uniform Fine Sand #1	2.15E-05
2	Uniform Fine Sand #2	1.13E-05
3	Sandy Loam	5.83E-06
4	Very Fine Sand	2.00E-05
5	Sandy Silt (Tails)	4.80E-07
6	Silty Sand	5.00E-07
7	Well-graded	1.00E-07
8	Well-graded #2	1.50E-08
9	Silt #2	1.00E-05
10	Glacial Till (Uncompact)	5.00E-05
11	Glacial Till (Compacted)	1.00E-07
12	Silt Loam	7.00E-07
13	Sandy Silty Clay	1.40E-07
14	Silty Clay (Fine Tails)	3.00E-08
15	Uniform Silt	1.00E-05
16	Clay/Silt	2.50E-05
17	Well-graded #3 (high clay)	7.00E-10
18	Uniform Sand	1.00E-04
19	Sand	5.40E-05
20	Fine Sand	4.30E-05
21	Silt	2.50E-07
22	Silt (Tailings)	5.80E-08
23	Sandy Clayey Silt	1.50E-08
24	Clayey Silt	8.40E-09

Tabel 3.4. Properti tanah pada *database* SEEP/W

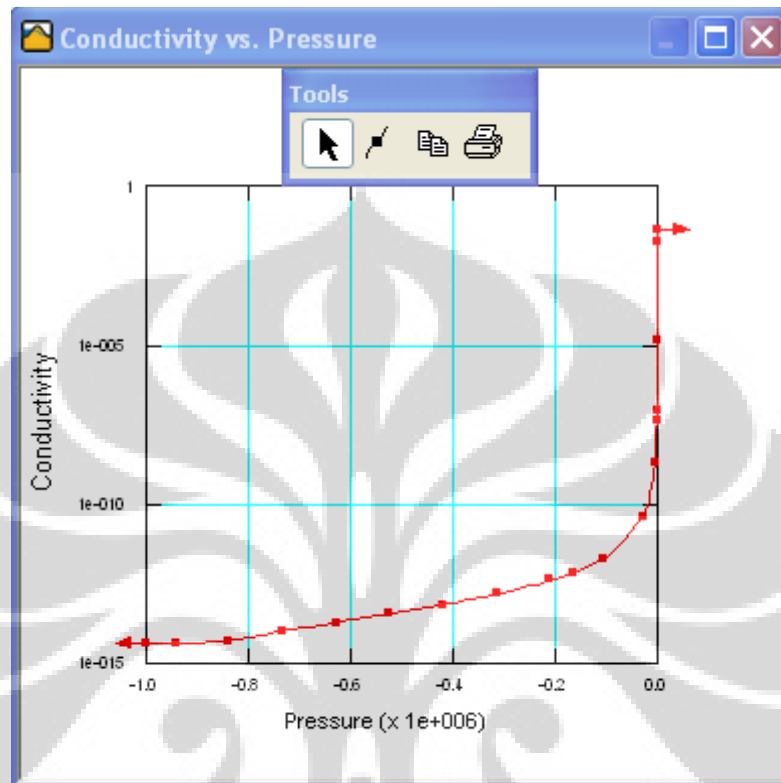
Pada pemodelan penelitian ini, dipakai pendekatan fungsi koefisien permeabilitas yang nilainya mendekati properti material asli Bendungan Nakasato, yaitu ;

- a. Zona kedap air 1 (5×10^{-8} m/s) menggunakan fungsi koefisien permeabilitas #22 Silt (tailings).



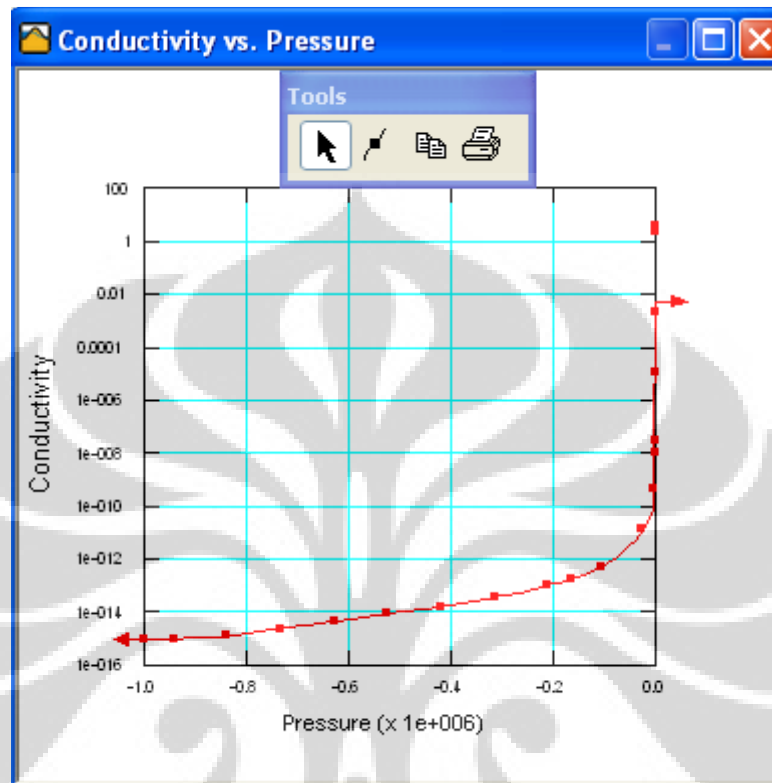
Gambar 3.13. Fungsi koefisien permeabilitas untuk Zona Kedap Air 1

- b. Zona kedap air 2 (5×10^{-7} m/s) menggunakan fungsi koefisien permeabilitas #5 Sandy Silt (tails).



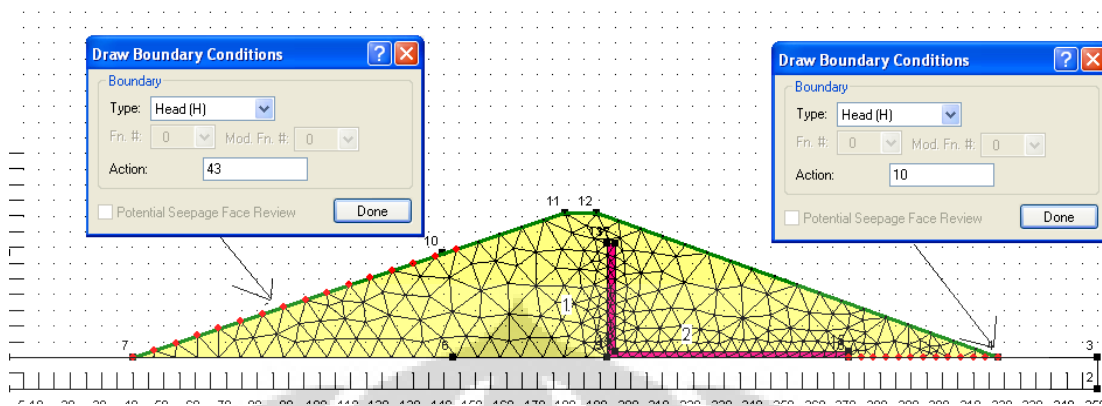
Gambar 3.14. Fungsi koefisien permeabilitas untuk Zona Kedap Air 2

- c. Drainage Filter (5×10^{-3} m/s) menggunakan fungsi koefisien permeabilitas #19 Sand.



Gambar 3.15. Fungsi koefisien permeabilitas untuk Drainage Filter

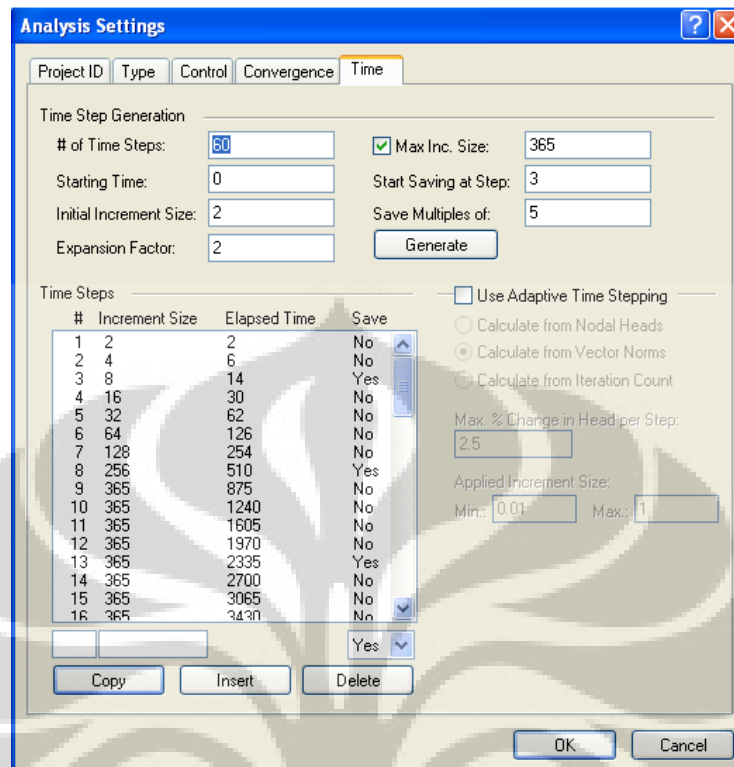
Pada kondisi *steady state*, input muka air (*water head*) pada bagian udik bendungan merupakan elevasi air pada keadaan bendungan penuh, yaitu ketinggian air (33 meter) ditambah dengan ketebalan zona alas kedap air (10 meter), sehingga input muka air pada pemodelan adalah 43 meter, yang diletakkan sepanjang lereng udik bendungan. Sedangkan input muka air pada bagian hilir bendungan adalah 10 meter, diletakkan sepanjang ujung dasar bendungan



Gambar 3.16. Input Water Head pada pemodelan bendungan kondisi *steady state*

II. Pemodelan kondisi *transient*

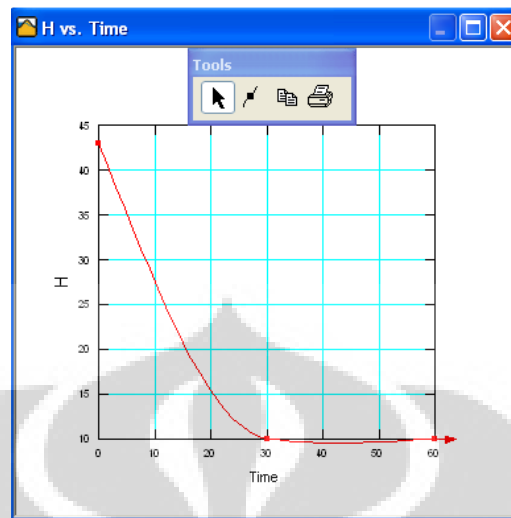
Pemodelan pada kondisi *transient* menggunakan pemodelan *steady state* sebagai kondisi awalnya (*initial condition*). Pada kondisi *transient*, kondisi *phreatic line* berubah seiring waktu, maka dari itu perlu ditentukan perhitungan terhadap waktunya. Pada kondisi *transient* ditinjau garis muka air dan faktor keamanan pada tubuh bendungan pada waktu awal, 30 hari, 1 tahun, 5 tahun, dan seterusnya setiap 5 tahun sampai waktu ke 55 tahun.



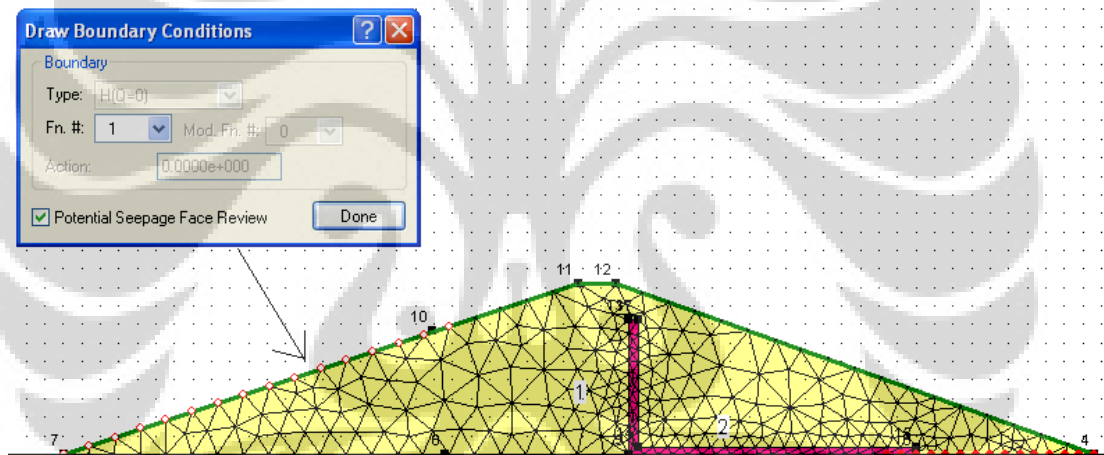
Gambar 3.17. Time Stepping

Pada kondisi *transient*, input muka air (*water head*) pada bagian udik bendungan merupakan fungsi waktu yang bervariasi pada kecepatan drawdown, yaitu :

- *Head* turun dari 43 meter ke 10 meter dalam waktu 1 hari.
- *Head* turun dari 43 meter ke 10 meter dalam waktu 3 hari.
- *Head* turun dari 43 meter ke 10 meter dalam waktu 7 hari.
- *Head* turun dari 43 meter ke 10 meter dalam waktu 15 hari.
- *Head* turun dari 43 meter ke 10 meter dalam waktu 30 hari.



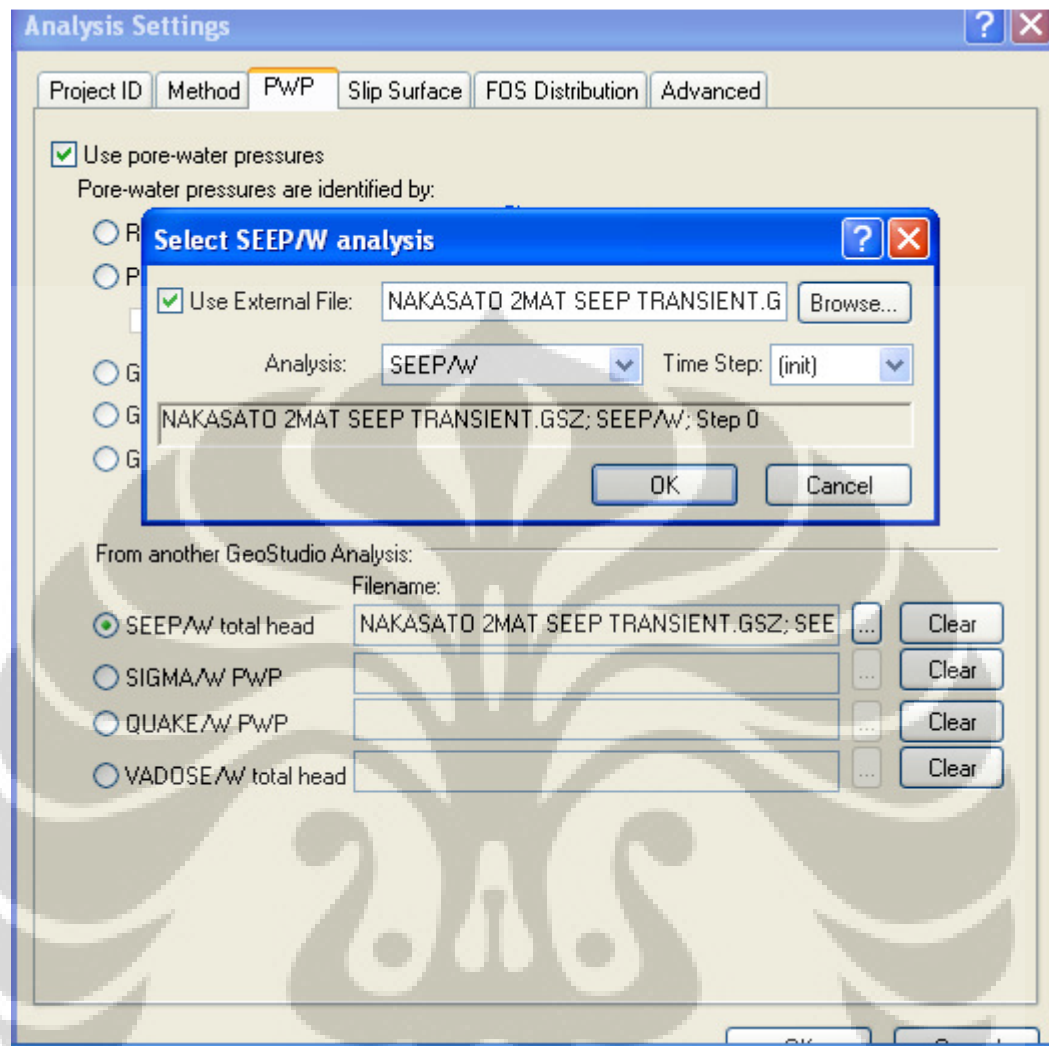
Gambar 3.18. Fungsi batas muka air.



Gambar 3.19. Input *Water Head* pada pemodelan bendungan kondisi *transient*

III.4. Pemodelan dengan SLOPE/W + SEEP/W

Untuk melakukan perhitungan nilai faktor keamanan pada slope/W dengan kondisi *phreatic line* yang berasal dari SEEP/W, file SEEP/W yang telah dijalankan hasilnya digunakan sebagai nilai Pore Water Pressure pada bagian Analysis Settings SLOPE/W.

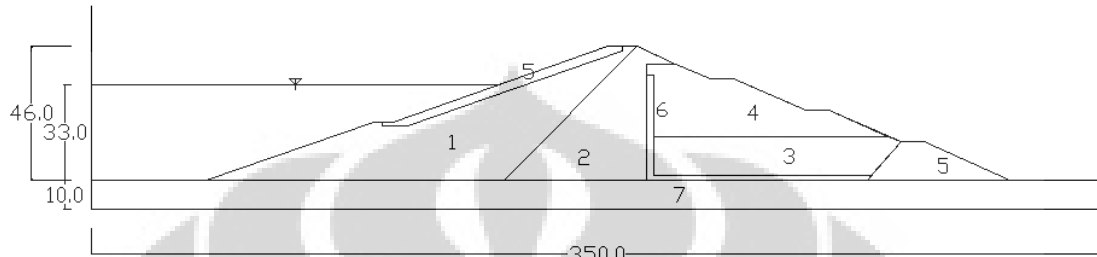


Gambar 3.20. Pengaturan Pore Water Pressure dari SEEP/W pada analisis SLOPE/W

III.5. Ringkasan pemodelan pada penelitian

Berikut adalah ringkasan dari pemodelan yang akan dilakukan untuk mendapatkan nilai faktor keamanan :

1. Pemodelan dengan SLOPE/W



No	Zona	Y (KN/m3)	Ysat (KN/m3)	c (KN/m2)	ϕ	Koefisien Filtrasi (cm/dtk)
1	Zona Kedap Air 1	20.9	21.1	60	19	5.00E-06
2	Zona Kedap Air 2	20.9	21.1	30	25	5.00E-05
3	Zona Sembarang 1	20.9	21.1	30	32	5.00E-04
4	Zona Sembarang 2	18	19	10	25	1.00E-04
5	Zona timbunan batu	18	21	0	35	1.00E-02
6	Drainage Filter	20	22	0	30	5.00E-03
7	Alas Kedap Air	18	19	50	15	5.00E-06

Gambar 3.21. Geometri dan properti tanah Bendungan Nakasato (Sosrodarsono, & Takeda,

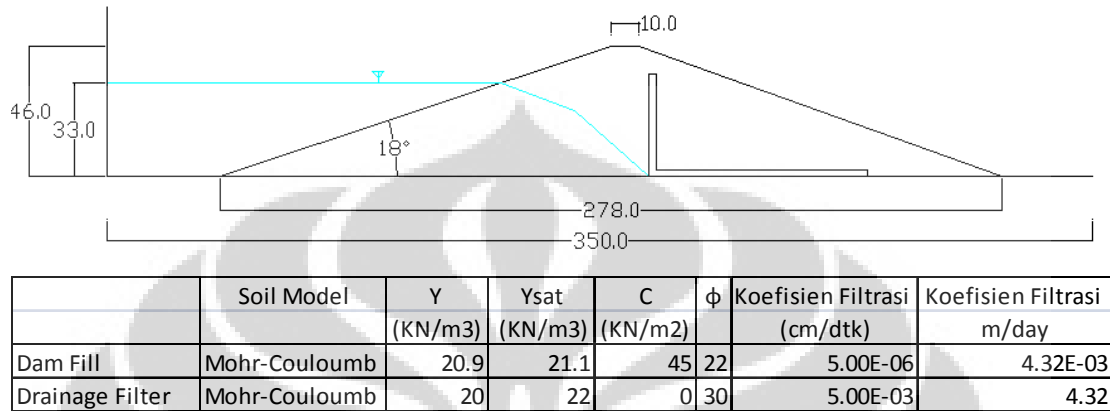
1977)

Kondisi yang ditinjau :

- Kondisi pada saat bendungan selesai dibangun.
- Kondisi pada saat ketinggian air 33 meter dari dasar bendungan (bendungan penuh).
- Kondisi pada saat terjadi *rapid drawdown*.

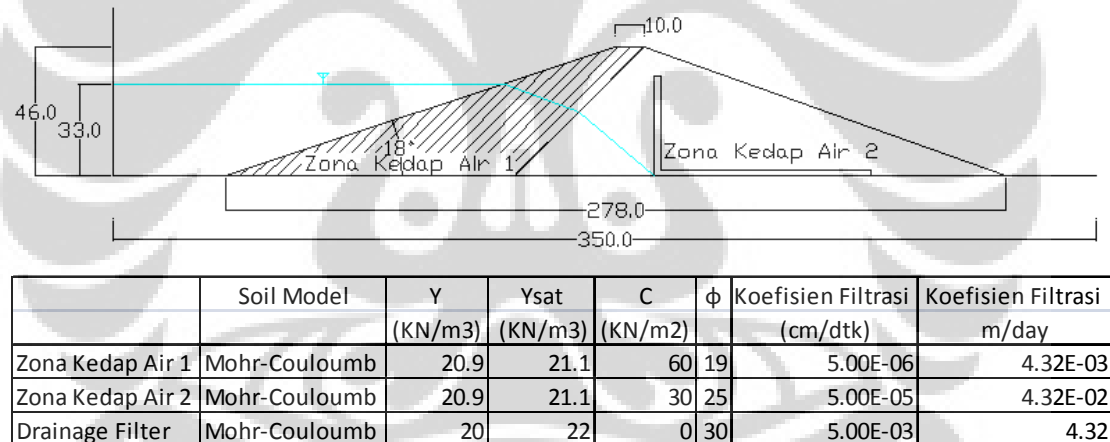
2. Pemodelan dengan SLOPE/W + SEEP/W dengan penyederhanaan geometri bendungan.

a. 1 Material



Gambar 3.22. Geometri dan properti tanah Bendungan Nakasato disederhanakan (1 material)

b. 2 Material



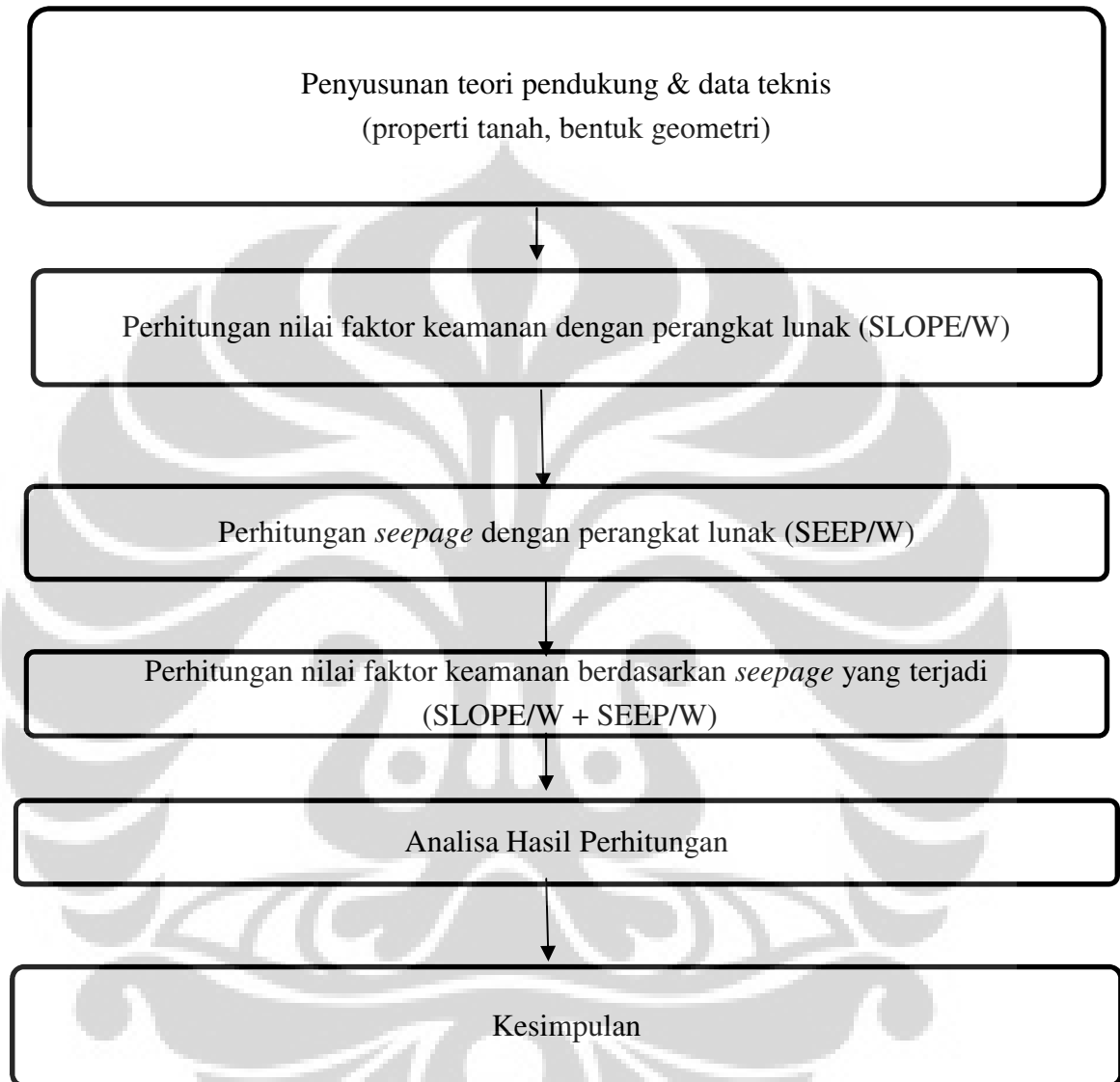
Gambar 3.23. Geometri dan properti tanah Bendungan Nakasato disederhanakan (2 material)

Kondisi yang ditinjau :

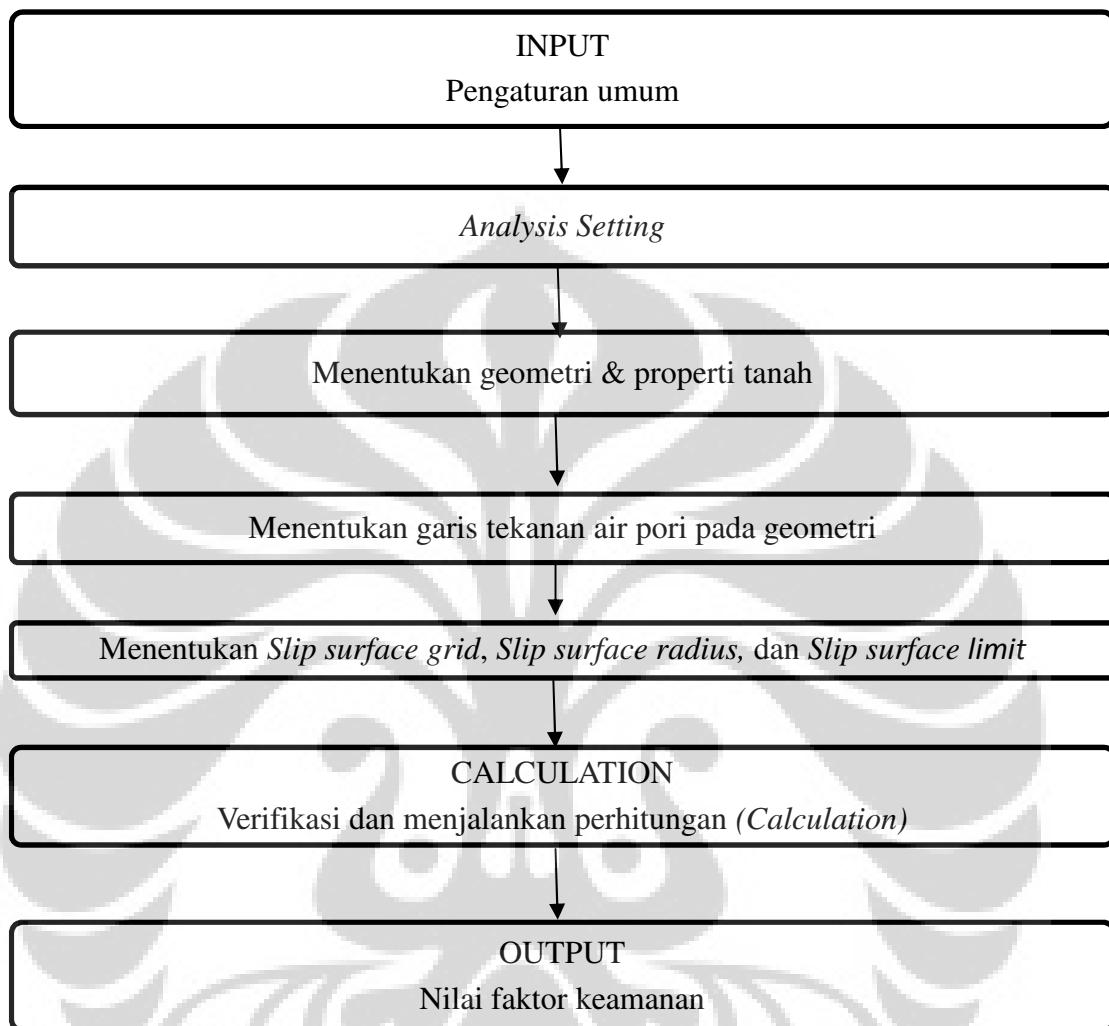
- Kondisi pada saat bendungan selesai dibangun.
- Kondisi pada saat ketinggian air 33 meter dari dasar bendungan (bendungan penuh).
- Kondisi pada saat terjadi *rapid drawdown*. Pada kondisi transient faktor keamanan lereng bendungan pada 30 hari, 1 tahun, 5 tahun, dan seterusnya setiap 5 tahun sampai waktu ke 55 tahun.

III.6. Diagram Alir Penelitian

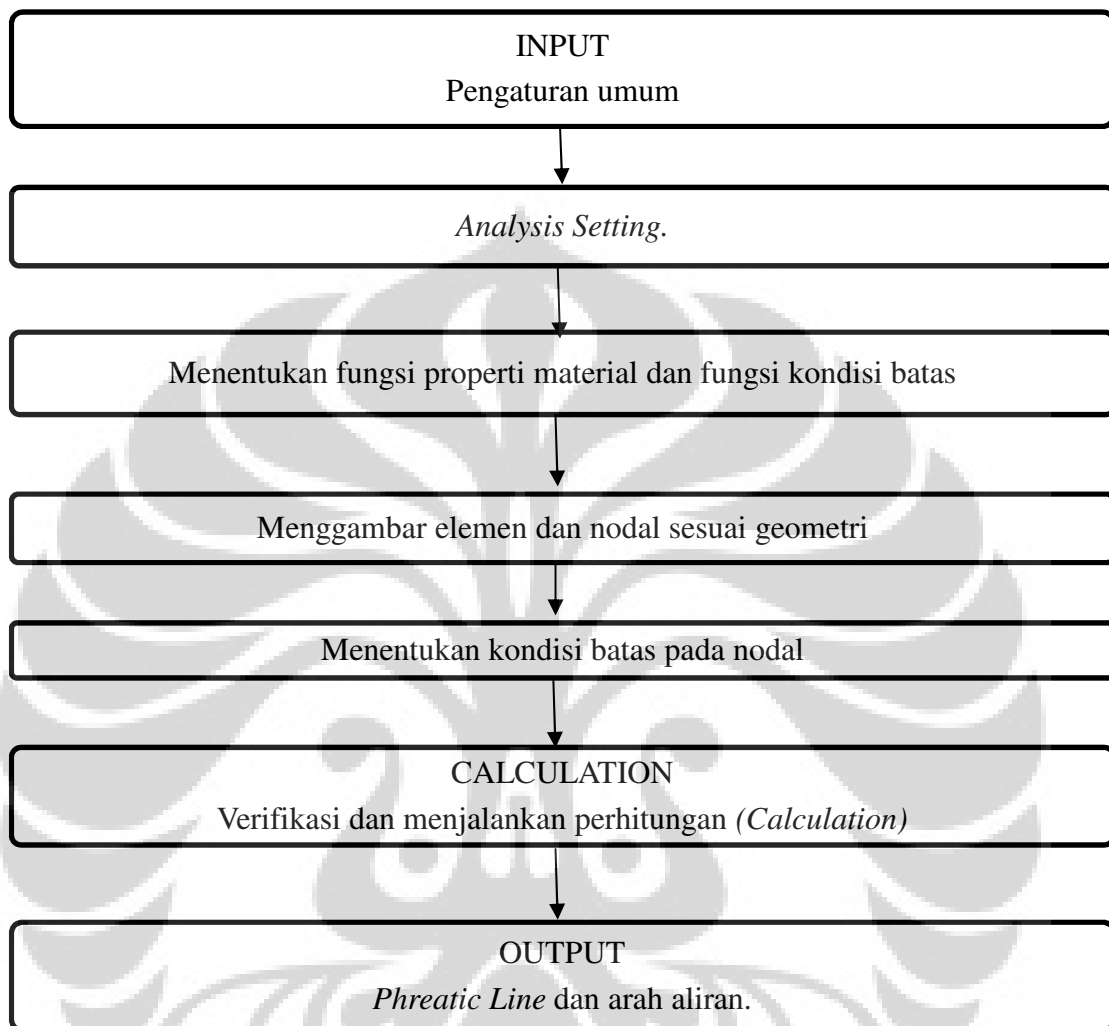
III.6.1. Diagram Alir Sistematika Pengerjaan Skripsi



III.6.2. Diagram Alir Pemodelan dengan SLOPE/W



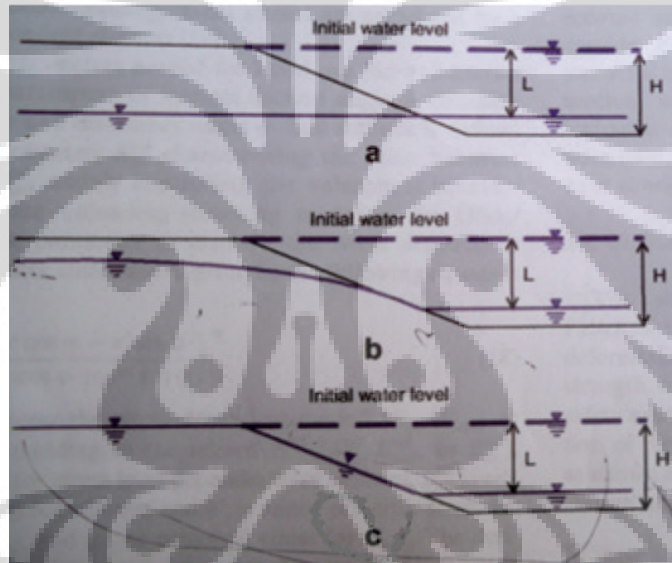
III.6.3 Diagram Alir Pemodelan dengan SEEP/W



BAB IV

ANALISA HASIL PEMODELAN

Salah satu dari penyebab kegagalan lereng pada bendungan urugan adalah peristiwa *rapid drawdown*, dimana terjadi penurunan muka air waduk secara cepat. *Rapid drawdown* dapat terjadi baik karena disengaja maupun tidak disengaja, misal : ketika pintu bangunan pelimpah bendungan (*spillway*) sengaja dibuka untuk mengatur tinggi muka air bendungan, ketika terjadi kebocoran pada tubuh bendungan, atau ketika curah hujan di daerah bendungan begitu tinggi sehingga muka air bendungan mengalami fluktuasi.



Gambar 4.1. a. *fully slow drawdown*; b. *transient drawdown*; c. *fully rapid drawdown*

Terdapat 3 kondisi *drawdown* dalam suatu bendungan., yaitu :

- a. *Slow drawdown*, yaitu kondisi dimana muka air turun secara perlahan-lahan dan *phreatic line* pada tubuh bendungan turun bersamaan dengan turunnya garis muka air.
- b. *Transient drawdown*, yaitu kondisi dimana muka air turun secara tiba-tiba dan *phreatic line* pada tubuh bendungan masih dalam kondisi ketika bendungan penuh dengan air.

- c. *Fully rapid drawdown*, yaitu kondisi dimana muka air turun secara tiba-tiba dan *phreatic line* pada tubuh bendungan masih dalam kondisi ketika bendungan penuh dengan air.

Dalam bab ini akan dipaparkan mengenai analisa bendungan tanah terhadap peristiwa *rapid drawdown*. Geometri dan parameter bendungan yang digunakan adalah milik Bendungan Nakasato. Bendungan ini merupakan bendungan tirai yang memiliki ketinggian 46 meter, dengan 2 lapisan kedap air pada bagian udiknya, dan ketinggian air bendungan dapat mencapai 33 meter dari dasar bendungan.

Dalam menganalisa simulasi kasus *rapid drawdown* yang terjadi, dibutuhkan bantuan perangkat lunak, perangkat lunak yang digunakan adalah :

1. Perangkat lunak SLOPE/W untuk mencari nilai Faktor Keamanan (*Factor of Safety*) lereng
2. Perangkat lunak SEEP/W untuk mengetahui aliran air dan gerakan *phreatic line* pada tubuh bendungan.

Analisa didasarkan pada bentuk geometri bendungan dan parameter tanah yang menyusun bendungan tersebut. Analisa dengan perangkat lunak ini semata – mata untuk memperlihatkan bagaimana pengaruh penurunan muka air bendungan secara tiba-tiba (*rapid drawdown*) terhadap nilai faktor keamanan lereng bendungan yang memiliki geometri dan parameter tanah seperti yang telah dijabarkan.

Analisa nilai faktor keamanan lereng bendungan dalam penelitian ini dibagi kedalam 2 bagian, yaitu :

1. Analisa faktor keamanan lereng bendungan hanya dengan software SLOPE/W dengan menggunakan geometri asli.
2. Analisa faktor keamanan lereng bendungan dengan software SLOPE/W + SEEP/W dengan menggunakan geometri yang telah disederhanakan.

Universitas Indonesia

IV.1. Analisa faktor keamanan lereng Bendungan Nakasato asli dengan SLOPE/W

Untuk menganalisa perubahan nilai faktor keamanan pada saat terjadi *rapid drawdown* pada Bendungan Nakasato bagian udik bendungan, digunakan software SLOPE/W. Perhitungan nilai faktor keamanan dengan SLOPE/W akan dilakukan pada geometri dan properti material bendungan asli berdasarkan referensi (Sosrodarsono, & Takeda. 1977).

Dengan properti tanah sebagai berikut :

No	Zona	Y (KN/m3)	Ysat (KN/m3)	c (KN/m2)	ϕ	Koefisien Filtrasi (cm/dtk)
1	Zona Kedap Air 1	20.9	21.1	60	19	5.00E-06
2	Zona Kedap Air 2	20.9	21.1	30	25	5.00E-05
3	Zona Sembarang 1	20.9	21.1	30	32	5.00E-04
4	Zona Sembarang 2	18	19	10	25	1.00E-04
5	Zona timbunan batu	18	21	0	35	1.00E-02
6	Drainage Filter	20	22	0	30	5.00E-03
7	Alas Kedap Air	18	19	50	15	5.00E-06

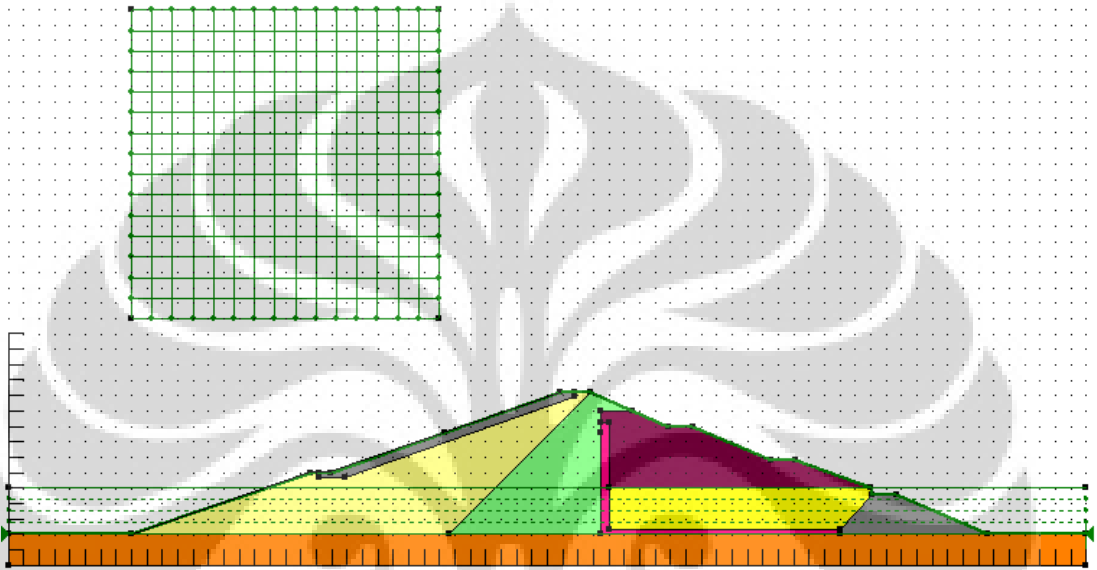
Tabel 4.1. Parameter material pemodelan

Terdapat 3 kondisi bendungan yang akan disimulasikan dengan program SLOPE/W,

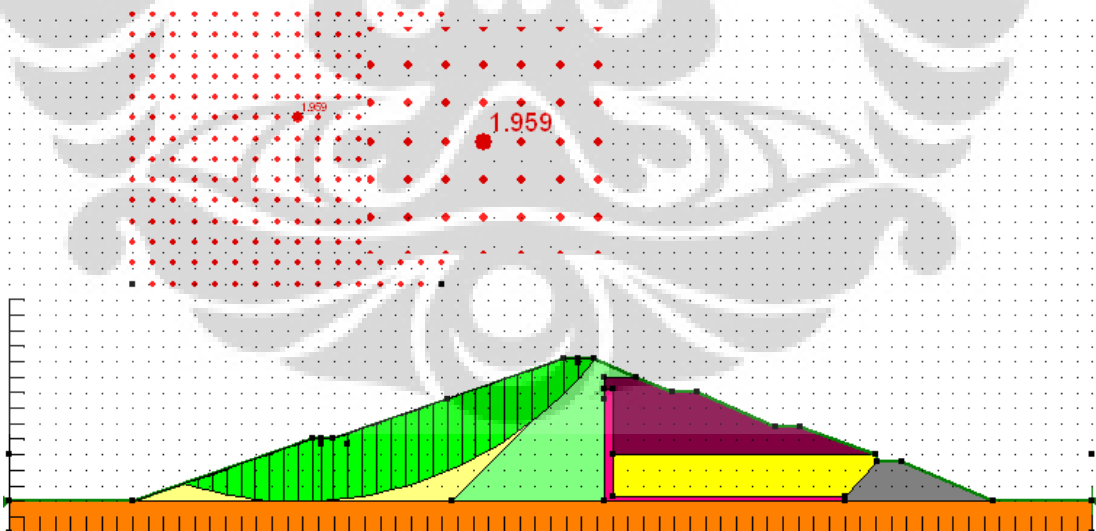
1. Kondisi pertama, yaitu kondisi segera setelah bendungan selesai dibangun. Lingkaran bidang longsor menyinggung permukaan pondasi
2. Kondisi kedua, yaitu kondisi ketika air waduk mencapai ketinggian 33 meter dari dasar bendungan. Lingkaran bidang longsor menyinggung permukaan pondasi.
3. Kondisi ketiga, yaitu kondisi ketika terjadi *rapid drawdown*, dimana gaya hidrostatis yang diberikan air kepada tubuh bendungan menghilang, namun tekanan air pori dalam tubuh bendungan masih tinggi. Lingkaran bidang longsor menyinggung permukaan pondasi.

IV.1.1. Nilai faktor keamanan Bendungan Nakasato kondisi pertama

Pada pemodelan kondisi pertama, kondisi bendungan baru selesai dibangun dan belum ada air yang mengisi bendungan. *Slip Surface Radius* diletakkan sampai sebatas alas kedap air agar didapat bidang longsor yang menyinggung permukaan pondasi bendungan.



Gambar 4.2. Pemodelan kondisi pertama (SLOPE/W)



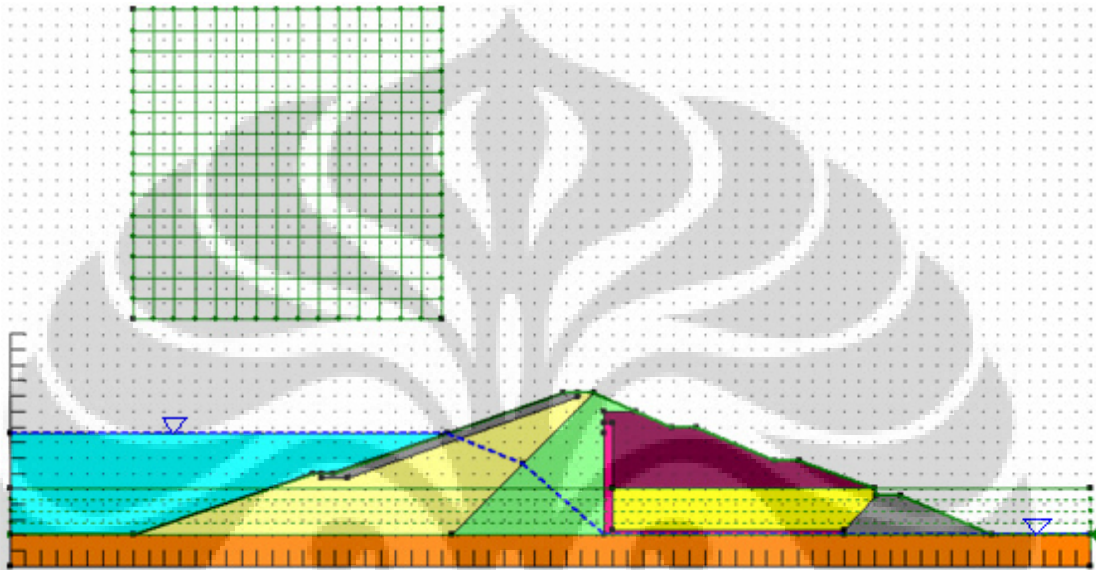
Gambar 4.3. Nilai Faktor Keamanan kondisi pertama (SLOPE/W)

Dari hasil menjalankan program SLOPE/W didapat nilai faktor keamanan bendungan untuk kondisi pertama sebesar 1.959

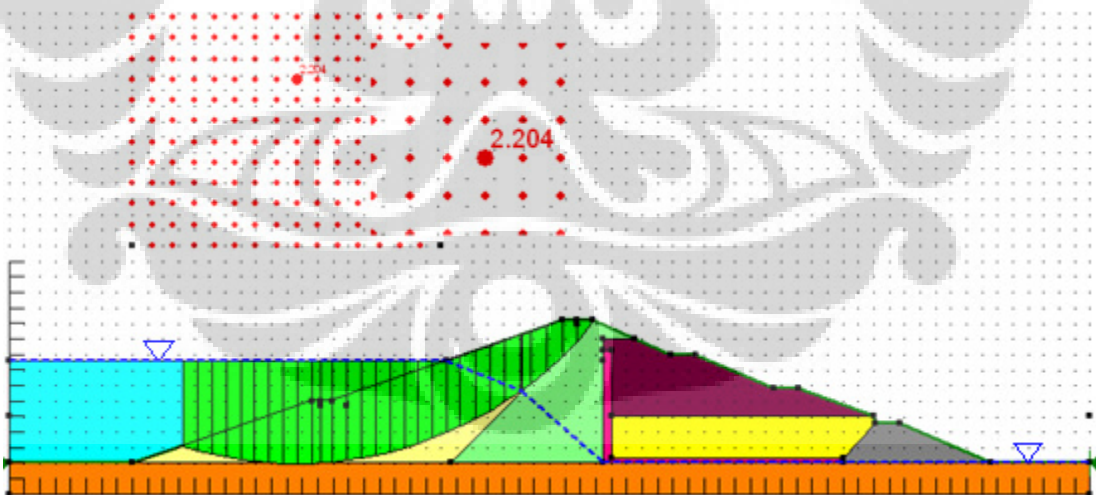
Universitas Indonesia

IV.1.2. Nilai faktor keamanan Bendungan Nakasato kondisi kedua

Untuk memberikan gaya hidrostatik yang diberikan air pada tubuh bendungan pada pemodelan kondisi kedua, digunakan material *no strength* sebagai air dengan berat jenis 9.807 kN/m^3 . *Slip Surface Radius* diletakkan sampai sebatas alas kedap air.



Gambar 4.4. Pemodelan kondisi pertama (SLOPE/W)

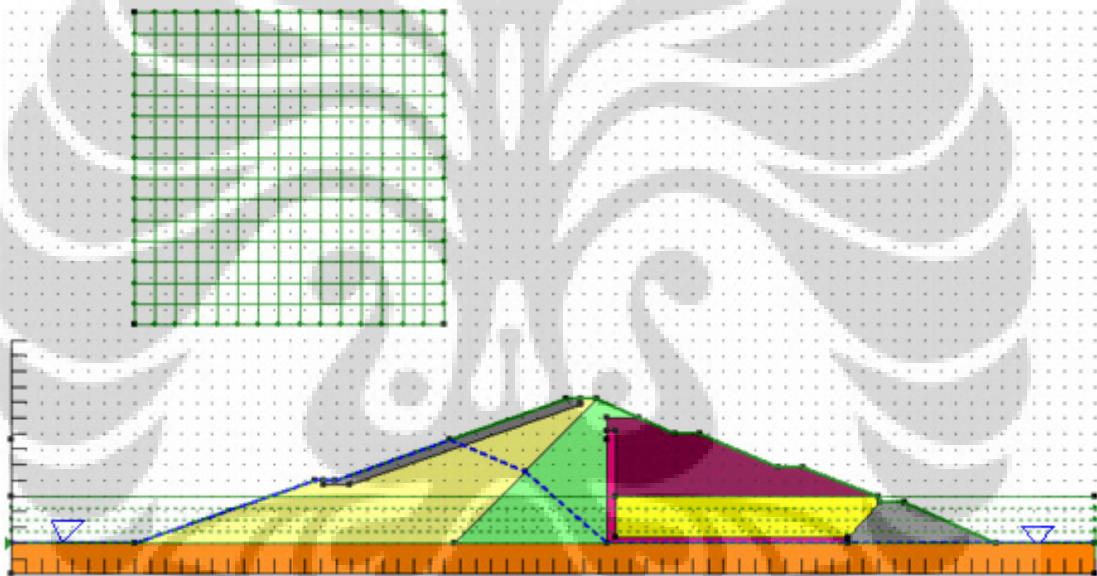


Gambar 4.5. Nilai Faktor Keamanan kondisi kedua (SLOPE/W)

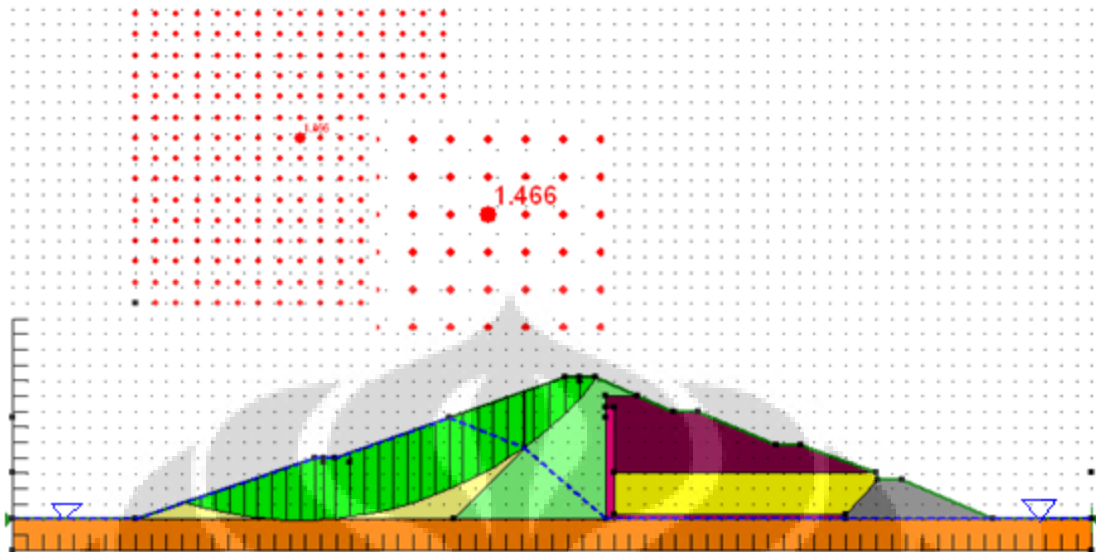
Dari hasil menjalankan program SLOPE/W didapat nilai faktor keamanan bendungan untuk kondisi kedua sebesar 2.204

IV.1.3. Nilai faktor keamanan Bendungan Nakasato kondisi ketiga

Pemodelan kondisi ketiga merupakan kondisi bendungan ketika telah terjadi *rapid drawdown*, dimana air di udik bendungan telah menghilang, namun kondisi tekanan air pori dalam tubuh bendungan masih tetap sama seperti kondisi kedua, hal ini merupakan kondisi yang paling berbahaya dari *rapid drawdown*. Untuk melakukan pemodelan kondisi tersebut maka material *no strength* akan dihilangkan, kemudian garis piezometric air akan diletakkan sepanjang permukaan lapisan alas dan dinding bendungan. *Slip Surface Radius* diletakkan sampai sebatas alas kedap air agar didapat bidang longsor yang menyinggung permukaan pondasi bendungan.



Gambar 4.6. Pemodelan kondisi ketiga (SLOPE/W)



Gambar 4.7. Nilai Faktor Keamanan kondisi ketiga (SLOPE/W)

Dari hasil menjalankan program SLOPE/W didapat nilai faktor keamanan bendungan untuk kondisi ketiga sebesar 1.466

Dari ketiga kondisi pemodelan, didapat perubahan nilai faktor keamanan sebagai berikut :

Kondisi	Faktor Keamanan
I	1.959
II	2.204
III	1.466

Tabel 4.2. Nilai faktor keamanan untuk tiap kondisi pemodelan (SLOPE/W)

Dari hasil ketiga pemodelan diatas didapat nilai faktor keamanan pada kondisi pertama adalah sebesar 1.959, kemudian mengalami peningkatan pada kondisi kedua menjadi 2.204, hal ini menunjukkan bahwa adanya penambahan kekuatan geser tanah pada lereng udik bendungan akibat adanya gaya hidrostatis air yang ikut menahan tubuh bendungan itu sendiri, dengan bertambahnya kekuatan geser tanah maka bertambah pula stabilitas dan nilai faktor keamanan dari bendungan tersebut.

Nilai faktor keamanan bendungan pada kondisi ketiga berkurang menjadi 1.466. Hilangnya gaya hidrostatis air sepanjang permukaan udik

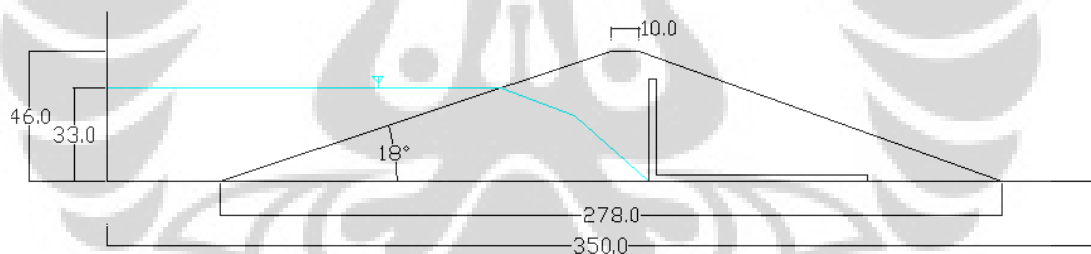
bendungan berdampak pada berkurangnya kekuatan geser bendunga. Sedangkan kondisi tekanan air pori pada tubuh bendungan yang masih tinggi akibat belum terjadi disipasi membuat stabilitas bendungan menjadi berkurang.

IV.2. Analisa faktor keamanan lereng Bendungan Nakasato yang disederhanakan dengan SLOPE/W +SEEP/W

Pemodelan untuk mencari nilai faktor keamanan lereng bendungan dengan SLOPE/W + SEEP/W menggunakan geometri dan properti bendungan yang telah disederhanakan, yaitu bendungan 1 material dan 2 material. Penggunaan SEEP/W lebih ditekankan untuk mencari *phreatic line* pada tubuh bendungan sesuai koefisien filtrasinya masing-masing.

IV.2.1. Penyederhanaan bendungan 1 material

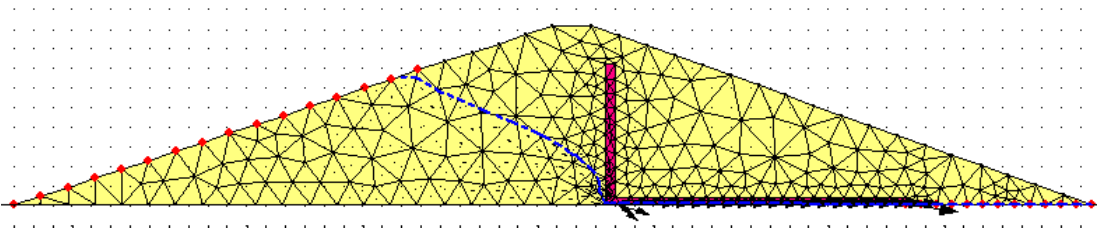
Geometri yang digunakan penyederhanaan Bendungan Nakasato menjadi bendungan sederhana dengan 1 material.



	Soil Model	Y (KN/m ³)	Ysat (KN/m ³)	C (KN/m ²)	φ	Koefisien Filtrasi (cm/dtk)	Koefisien Filtrasi m/day
Dam Fill	Mohr-Couloumb	20.9	21.1	45	22	5.00E-06	4.32E-03
Drainage Filter	Mohr-Couloumb	20	22	0	30	5.00E-03	4.32

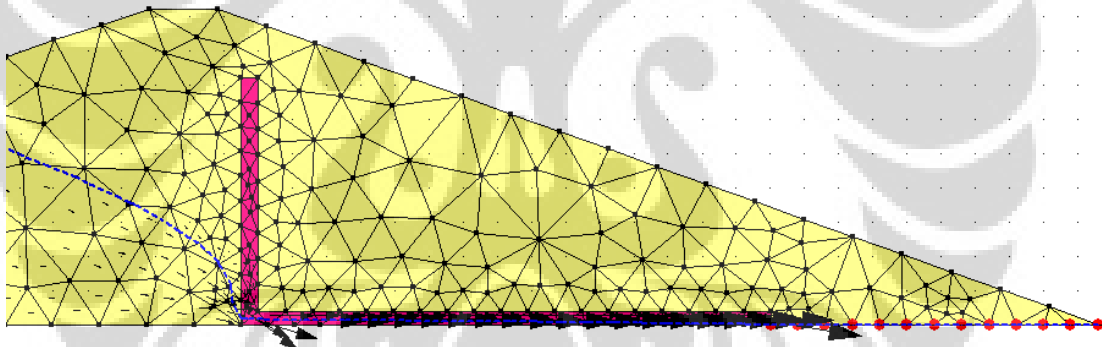
Gambar 4.8. Geometri dan properti tanah Bendungan Nakasato disederhanakan (1 material)

Dari hasil perhitungan software SEEP/W didapat garis muka air pada tubuh bendungan yang memiliki koefisien permeabilitas 4.32×10^{-3} m/hari. Pada saat kondisi air didalam bendungan penuh (*steady state*).



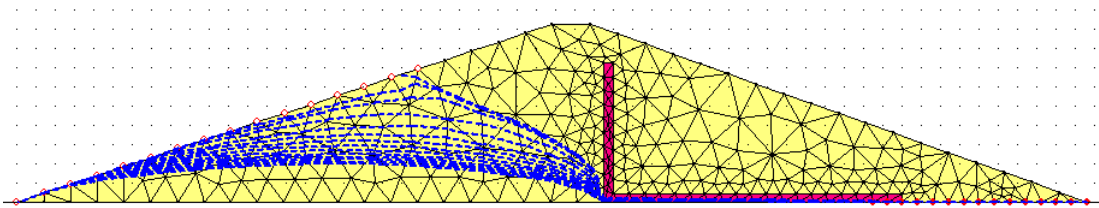
Gambar 4.9. *Phreatic line* dalam tubuh bendungan 1 material hasil SEEP/W

Arah aliran air dalam tubuh bendungan ditunjukkan oleh vektor-vektor berupa tanda panah pada tiap elemen. Dari hasil pemodelan, didapat arah aliran air pada tubuh bendungan mengarah ke zona drainage filter yang memiliki koefisien permeabilitas yang lebih besar dibandingkan dengan tubuh bendungan, dan air mengalir melalui drainage filter ke daerah hilir bendungan. Hal ini sesuai dengan fungsi dari drainage filter dalam tubuh bendungan itu sendiri yaitu untuk mengurangi tekanan air pori dalam tubuh bendungan agar tidak mengurangi kekuatan lereng bendungan.

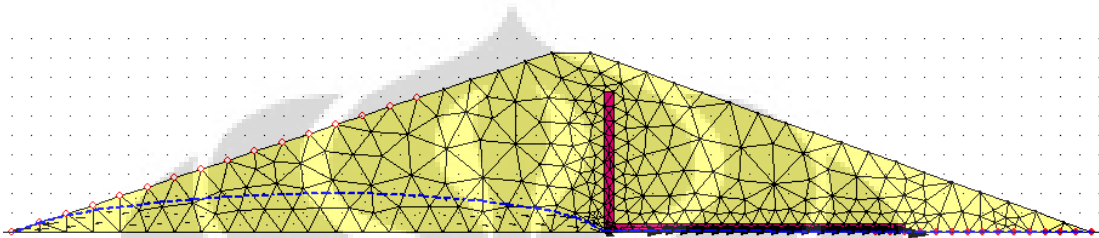


Gambar 4.10. Arah aliran air melalui drainage filter

Kondisi *steady state* ini menjadi kondisi awal dalam perhitungan kondisi *transient*. Pada kondisi transient ditinjau garis muka air dan faktor keamanan pada tubuh bendungan pada waktu awal, 30 hari, 1 tahun, 5 tahun, dan seterusnya setiap 5 tahun sampai waktu ke 55 tahun.

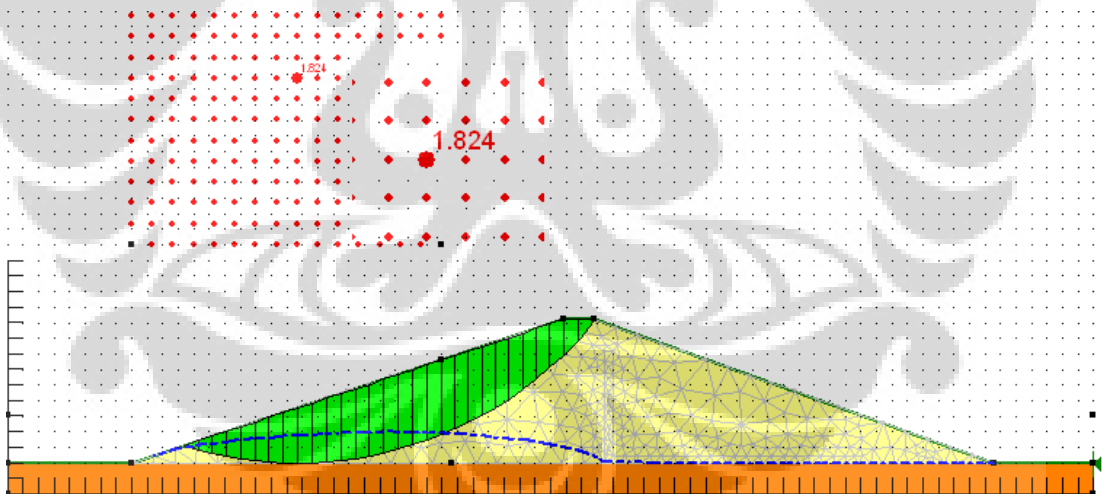


Gambar 4.11. *Phreatic line* dalam tubuh bendungan 1 material kondisi *transient* (0-55 tahun)



Gambar 4.12. *Phreatic line* dalam tubuh bendungan 1 material pada waktu ke 55 tahun

Dari kondisi garis muka air pada tubuh bendungan yang didapat dari SEEP/W, kemudian akan digabungkan dengan software SLOPE/W sehingga dapat dihitung nilai faktor keamanan lereng bendungan pada tiap waktu peninjauan.

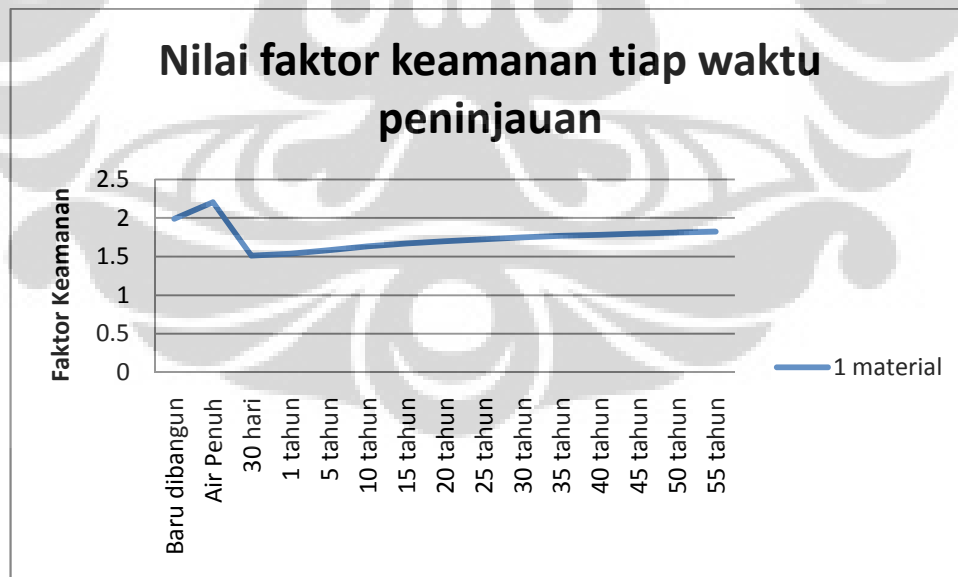


Gambar 4.13. Nilai faktor keamanan bendungan 1 material pada saat waktu ke 55 tahun

Berikut adalah hasil perhitungan nilai faktor keamanan tiap waktu peninjauan :

Waktu Peninjauan	Nilai FS
Baru dibangun	1.988
Air Penuh	2.206
30 hari	1.490
1 tahun	1.538
5 tahun	1.585
10 tahun	1.632
15 tahun	1.67
20 tahun	1.698
25 tahun	1.724
30 tahun	1.747
35 tahun	1.768
40 tahun	1.784
45 tahun	1.798
50 tahun	1.812
55 tahun	1.824

Tabel 4.3. Nilai FS bendungan 1 material untuk tiap waktu peninjauan



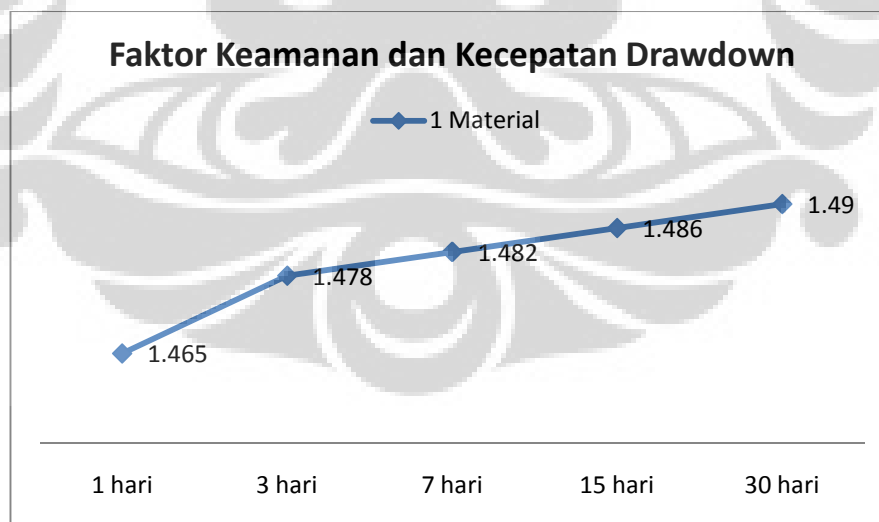
Gambar 4.14. Grafik nilai FS bendungan 1 material tiap waktu peninjauan

Dari grafik diatas dapat dilihat nilai faktor keamanan tiap waktu peninjauan. Kondisi lereng paling kritis terjadi pada saat kondisi *water head* mencapai titik terendah dalam waktu 30 hari, terjadi penurunan nilai faktor keamanan sebanyak 31% dari 2.206 menjadi 1.490. Kemudian terjadi peningkatan nilai faktor keamanan akibat terdisipasinya tekanan air pori pada tubuh bendungan seiring dengan berjalannya waktu. Nilai faktor keamanan bendungan naik kembali dari 1.514 sebanyak 0.31 menjadi 1.824 setelah 55 tahun, dengan rata-rata kenaikan nilai faktor keamanan sebesar 0.025 per 5 tahun.

Untuk nilai faktor keamanan yang didapat dari variasi kecepatan *drawdown* yang terjadi dapat dilihat sebagai berikut :

Kecepatan Drawdown	Faktor Keamanan
Kondisi Penuh	2.196
1 hari	1.465
3 hari	1.478
7 hari	1.482
15 hari	1.486
30 hari	1.49

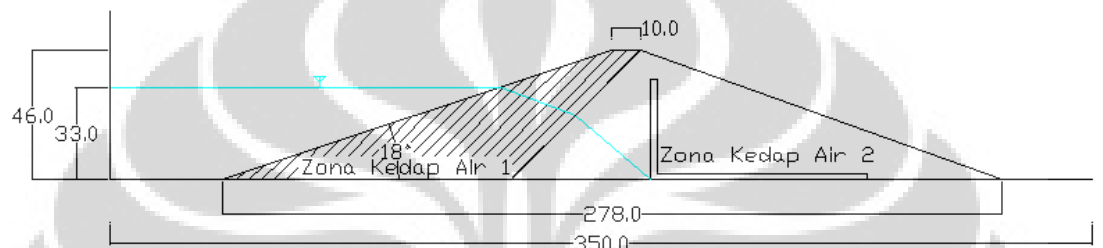
Tabel 4.4. Nilai FS bendungan 1 material untuk tiap variasi kecepatan *drawdown*



Gambar 4.15. Grafik nilai faktor keamanan berdasarkan variasi kecepatan drawdown untuk bendungan 1 material

IV.2.2. Penyederhanaan bendungan 2 material

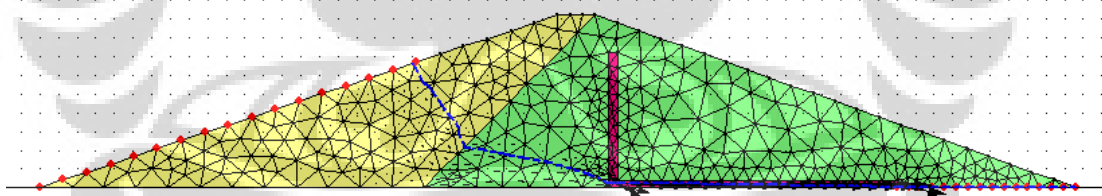
Pada penyederhanaan Bendungan Nakasato menjadi 2 material sebagai tubuh bendungan, terdapat dua jenis koefisien yang berbeda nilainya, yaitu untuk zona kedap air 1 memiliki nilai koefisien permeabilitas 4.32×10^{-3} m/hari, dan untuk zona kedap air 2 memiliki nilai koefisien permeabilitas 4.32×10^{-2} m/hari.



	Soil Model	Y (KN/m ³)	Ysat (KN/m ³)	C (KN/m ²)	φ	Koefisien Filtrasi (cm/dtk)	Koefisien Filtrasi m/day
Zona Kedap Air 1	Mohr-Couloumb	20.9	21.1	60	19	5.00E-06	4.32E-03
Zona Kedap Air 2	Mohr-Couloumb	20.9	21.1	30	25	5.00E-05	4.32E-02
Drainage Filter	Mohr-Couloumb	20	22	0	30	5.00E-03	4.32

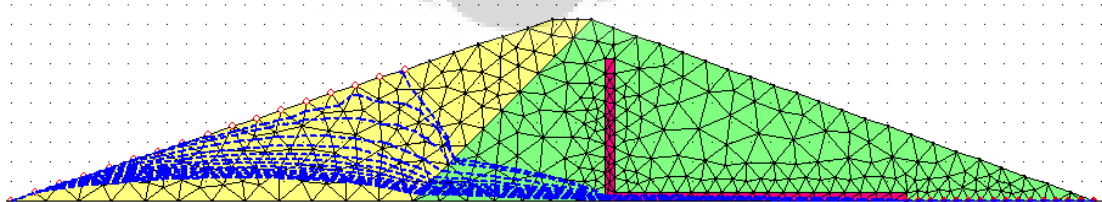
Gambar 4.16. Geometri dan properti tanah Bendungan Nakasato disederhanakan (2 material)

Garis muka air pada tubuh bendungan saat kondisi *steady state* :



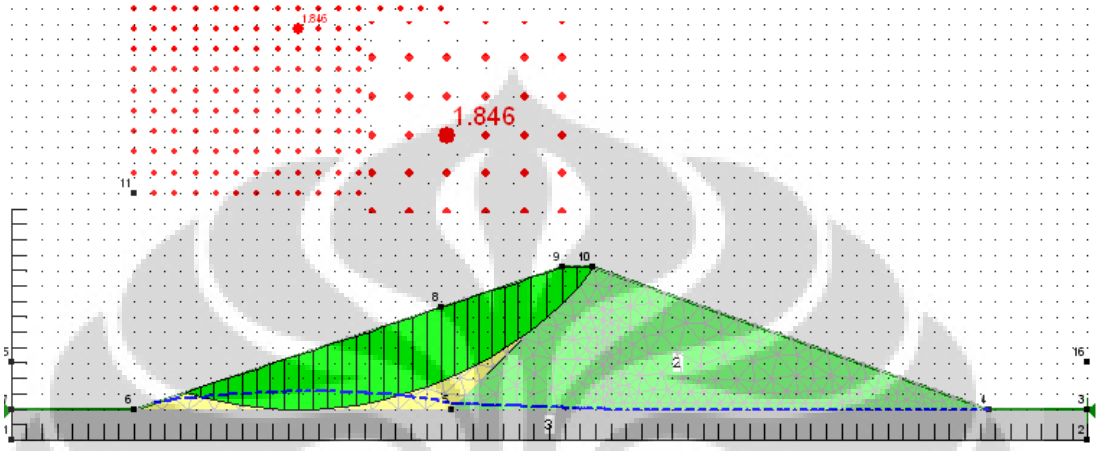
Gambar 4.17. Phreatic line dalam tubuh bendungan 2 material hasil SEEP/W

Untuk kondisi *transient* :



Gambar 4.18. Phreatic line dalam tubuh bendungan 2 material kondisi transient (0-55 tahun)

Dari kondisi garis muka air pada tubuh bendungan yang didapat dari SEEP/W, kemudian akan digabungkan dengan software SLOPE/W sehingga dapat dihitung nilai faktor keamanan lereng bendungan pada tiap waktu peninjauan.



Gambar 4.19. Nilai faktor keamanan bendungan 2 material pada saat waktu ke 55 tahun

Berikut adalah hasil perhitungan nilai faktor keamanan tiap waktu peninjauan :

Waktu Peninjauan	Nilai FS
Baru dibangun	1.917
Air Penuh	2.356
30 hari	1.584
1 tahun	1.634
5 tahun	1.68
10 tahun	1.716
15 tahun	1.744
20 tahun	1.766
25 tahun	1.783
30 tahun	1.8
35 tahun	1.814
40 tahun	1.824
45 tahun	1.832
50 tahun	1.84
55 tahun	1.846

Tabel 4.5. Nilai FS bendungan 2 material untuk tiap waktu peninjauan



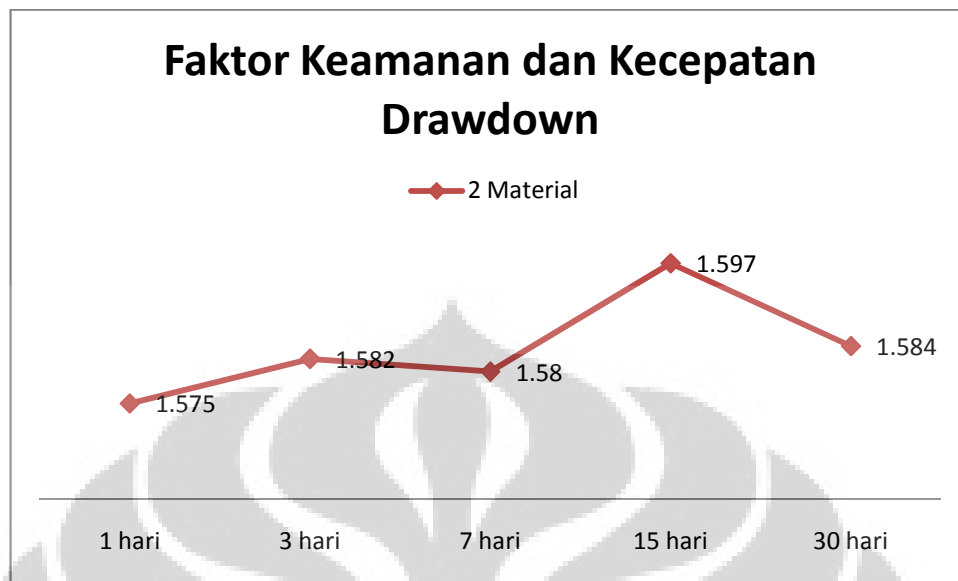
Gambar 4.20. Grafik nilai FS bendungan 2 material tiap waktu peninjauan

Dari grafik diatas dapat dilihat nilai faktor keamanan tiap waktu peninjauan. Kondisi lereng paling kritis terjadi pada saat kondisi *water head* mencapai titik terendah dalam waktu 30 hari, terjadi penurunan nilai faktor keamanan sebanyak 31% dari 2.356 menjadi 1.584. Kemudian terjadi peningkatan nilai faktor keamanan akibat terdisipasinya tekanan air pori pada tubuh bendungan seiring dengan berjalannya waktu. Nilai faktor keamanan bendungan naik kembali menjadi 1.608 setelah 30 hari setelah *drawdown* dan nilai faktor keamanan naik sebanyak 0.238 menjadi 1.846 setelah 55 tahun, dengan rata-rata kenaikan nilai faktor keamanan sebesar 0.019 per 5 tahun.

Untuk nilai faktor keamanan yang didapat dari variasi kecepatan *drawdown* yang terjadi dapat dilihat sebagai berikut :

Kecepatan Drawdown	Faktor Keamanan
Kondisi Penuh	2.356
1 hari	1.575
3 hari	1.582
7 hari	1.58
15 hari	1.597
30 hari	1.584

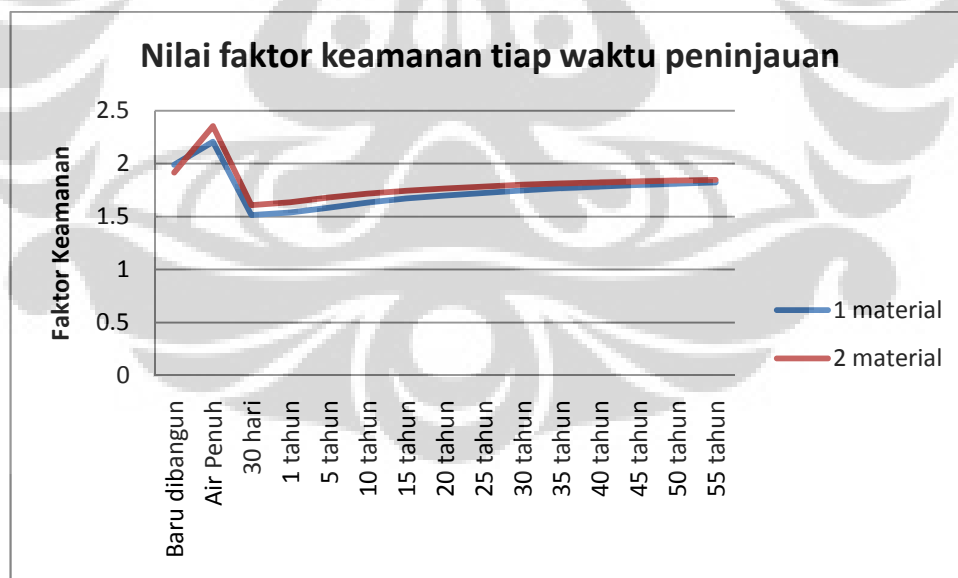
Tabel 4.6. Nilai FS bendungan 2 material untuk tiap variasi kecepatan *drawdown*



Gambar 4.21. Grafik nilai faktor keamanan berdasarkan variasi kecepatan drawdown untuk bendungan 1 material

IV.3. Analisa nilai faktor keamanan

Dari hasil perhitungan nilai faktor keamanan untuk bendungan 1 material dan 2 material dapat dibuat perbandingan.



Gambar 4.22. Grafik perbandingan nilai FS untuk kedua geometri bendungan

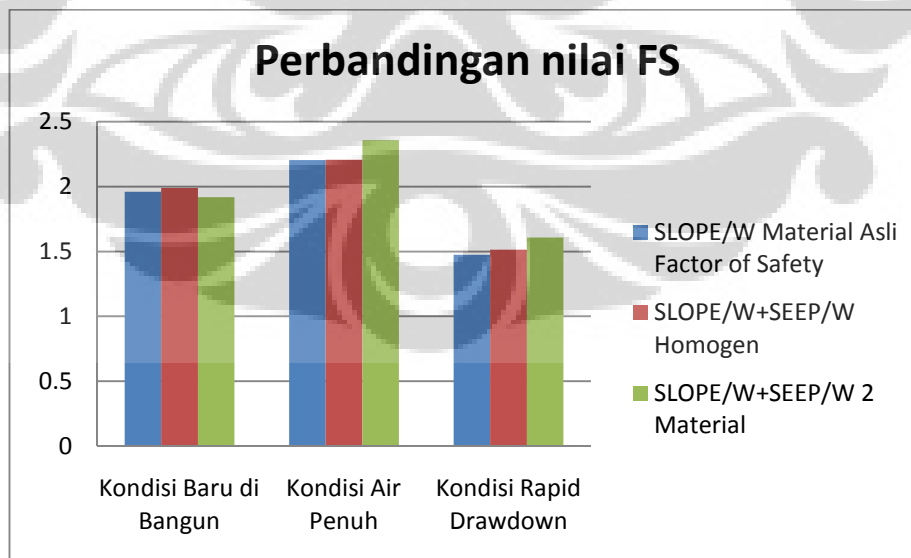
Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa penyederhanaan bendungan dengan 2 material memiliki nilai faktor keamanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan nilai faktor keamanan penyederhanaan bendungan dengan 1 material.

Pada grafik didapatkan bahwa kedua material mengalami penurunan nilai faktor keamanan ketika terjadi *rapid drawdown*. Pada kedua pemodelan terjadi penurunan rata-rata sebesar 31%, dimana faktor keamanan bendungan 1 material turun dari 2.206 menjadi 1.51, dan faktor keamanan bendungan 2 material turun dari 2.356 menjadi 1.608.

Dari hasil pemodelan *rapid drawdown* pada Bendungan Nakasato hanya dengan SLOPE/W didapat nilai faktor keamanan yang dapat dibandingkan dengan nilai faktor keamanan pemodelan bendungan dengan SLOPE/W+SEEP/W, sebagai berikut :

	SLOPE/W	SLOPE/W + SEEP/W		Grafik (Morgenstern)
	Material Asli	Homogen	2 Material	Homogen
	Faktor Keamanan			
Kondisi Baru di Bangun	1.959	1.988	1.917	-
Kondisi Air Penuh	2.204	2.206	2.356	-
Kondisi Rapid Drawdown	1.473	1.490	1.584	1.25

Tabel 4.7. Perbandingan nilai FS untuk SLOPE/W dan SLOPE/W+SEEP/W



Gambar 4.23. Grafik perbandingan nilai FS untuk metode yang dilakukan

Tabel dan grafik diatas menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan lereng bendungan pada kondisi *rapid drawdown* yang dihitung hanya dengan SLOPE/W bernilai lebih kecil dibandingkan dengan nilai faktor keamanan lereng bendungan yang dihitung dengan kombinasi SLOPE/W+SEEP/W.

Nilai faktor keamanan pada kondisi bendungan baru dibangun menunjukkan hasil yang tidak berbeda jauh untuk ketiga geometri bendungan, yaitu nilai faktor keamanan untuk kondisi baru dibangun adalah 1.959 untuk geometri Bendungan Nakasato asli, 1.988 untuk penyederhanaan bendungan menjadi 1 material, dan 1.917 untuk penyederhanaan bendungan menjadi 2 material. Nilai faktor keamanan ini menunjukkan bahwa dalam lereng bendungan tetap dalam kondisi stabil ketika bendungan selesai dibangun.

Nilai faktor keamanan yang dihitung hanya dengan SLOPE/W untuk kondisi *rapid drawdown* adalah 1.473, sedangkan nilai faktor keamanan pada kondisi *rapid drawdown* yang dihitung dengan SLOPE/W + SEEP/W bernilai 1.490 untuk penyederhanaan bendungan menjadi 1 material, dan 1.584 untuk penyederhanaan bendungan menjadi 2 material.

Dari perangkat lunak SEEP/W, dapat ditinjau distribusi tekanan air pori yang bekerja pada tubuh bendungan, Pada kondisi bendungan penuh dapat dilihat bahwa tekanan air pori pada tubuh bendungan dalam kondisi tertingginya, ketika terjadi *rapid drawdown* terjadi sedikit penurunan tekanan air pori yang besarnya penurunan tersebut bergantung pada kecepatan *drawdown*, dimana memiliki kecenderungan bahwa semakin cepat kecepatan *drawdown* yang terjadi maka, tekanan air pori yang tersisa dalam tubuh bendungan akan lebih tinggi.

Kecepatan Drawdown	Tekanan air pori tertinggi pada tubuh bendungan (kPa)	
	1 Material	2 Material
Kondisi Penuh	323.63	323.63
1 hari	245.54	205.24
3 hari	241.52	202.04
7 hari	239.91	204.68
15 hari	238.3	192.83
30 hari	236.42	202.49

Tabel 4.8. Nilai tekanan air pori tertinggi pada tubuh bendungan sesuai variasi kecepatan drawdown

Pada tabel diatas dapat dilihat bahwa terjadi penurunan nilai tekanan air pori pada tubuh bendungan baik pada bendungan 1 material maupun 2 material ketika terjadi *rapid drawdown*. Tekanan air pori pada bendungan 2 material memiliki penurunan yang lebih besar ketika terjadi *rapid drawdown* dibandingkan dengan penurunan tekanan air pori pada bendungan 1 material, hal ini dikarenakan pada bendungan material dibagi kedalam 2 material yang memiliki koefisien permeabilitas yang berbeda dimana koefisien permeabilitas untuk bendungan 2 material terdiri antara zona kedap air 1 (5×10^{-6} cm/s) dan zona kedap air 2 (5×10^{-5} cm/s), sedangkan untuk bendungan 1 material hanya memiliki satu nilai koefisien permeabilitas untuk tubuh bendungannya yaitu sebesar 5×10^{-6} cm/s .

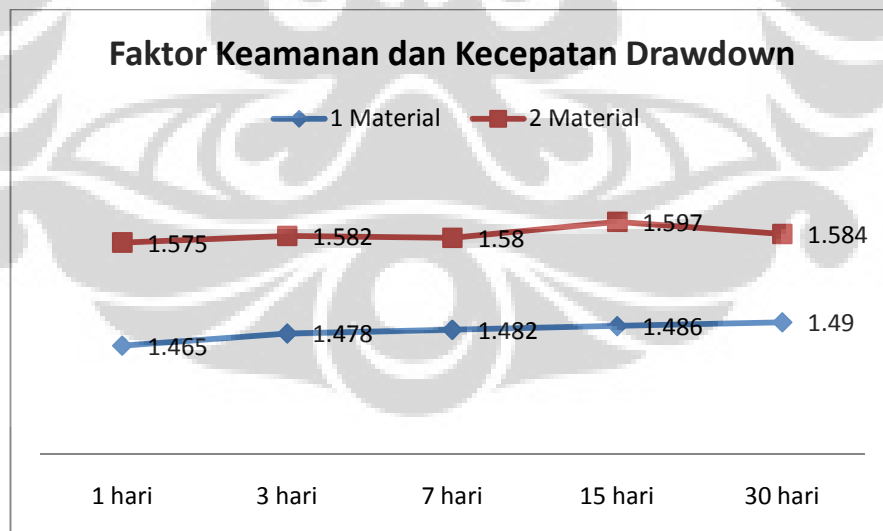
SLOPE/W memungkinkan untuk memeriksa tekanan air pori yang bekerja pada tiap irisan bidang longsor. Grafik dan tabel berikut menunjukkan nilai tekanan air pori sesuai dengan koordinat-X pada geometri bendungan 1 material :

1 Material		
Kecepatan Drawdown	Tekanan Air Pori Tertinggi pada irisan bidang longsor (kPa)	Faktor Keamanan
Kondisi Penuh	321.67	2.196
1 hari	183.55	1.465
3 hari	177.76	1.478
7 hari	176.76	1.482
15 hari	175.71	1.486
30 hari	174.53	1.49

Tabel 4.9. Tabel nilai tekanan air pori tertinggi pada irisan bidang longsor dan nilai faktor keamanan untuk variasi kecepatan drawdown (bendungan 1 material)

2 Material		
Kecepatan Drawdown	Tekanan Air Pori Tertinggi pada irisan bidang longsor (kPa)	Faktor Keamanan
Kondisi Penuh	320.89	2.356
1 hari	173.41	1.575
3 hari	169.44	1.582
7 hari	171.55	1.58
15 hari	161.3	1.597
30 hari	170.2	1.584

Tabel 4.10. Tabel nilai tekanan air pori tertinggi pada irisan bidang longsor dan nilai faktor keamanan untuk variasi kecepatan drawdown (bendungan 2 material)



Gambar 4.24. Grafik faktor keamanan untuk variasi kecepatan *drawdown*

Pada tabel diatas dapat dilihat bahwa terjadi penurunan tekanan air pori pada tubuh bendungan dari kondisi penuh ke kondisi *rapid drawdown*. Pada kondisi penuh, tekanan air pori tertinggi dicapai sebesar 321.67 kPa, kemudian tekanan air pori turun menjadi 174.53 kPa ketika terjadi *rapid drawdown*. Penurunan tekanan air pori pada tubuh bendungan terjadi akibat hilangnya material air pada tubuh bendungan.

Data nilai tekanan air pori pada tubuh bendungan yang lebih lengkap pada tabel 4.8 dapat dilihat pada lampiran 2, dan lampiran 3. Data nilai tekanan air pori pada tiap irisan yang lebih lengkap pada tabel 4.9, dan tabel 4.10 dapat dilihat pada lampiran 4, dan lampiran 5.

Dari grafik nilai faktor keamanan untuk variasi kecepatan *drawdown* didapat bahwa tidak terdapat perubahan yang signifikan terhadap nilai faktor keamanan untuk tiap variasi kecepatan *drawdown*. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan terkecil didapat untuk kecepatan *drawdown* 1 hari baik untuk penyederhanaan bendungan 1 material dan 2 material. Untuk pemodelan bendungan 1 material, terjadi peningkatan nilai faktor keamanan untuk kecepatan *drawdown* yang semakin lama, walaupun tidak menunjukkan perubahan yang signifikan terhadap nilai faktor keamanan.

Grafik dan tabel diatas menunjukkan korelasi antara nilai faktor keamanan lereng bendungan dan tekanan air porinya, bahwa nilai faktor keamanan lereng bendungan dipengaruhi oleh tekanan air pori didalam lereng tersebut. Semakin tinggi nilai tekanan air pori maka nilai faktor keamanan akan cenderung berkurang, hal ini dikarenakan semakin tinggi nilai tekanan air porinya, semakin kecil nilai tegangan efektifnya.

Pengaruh variasi kecepatan *drawdown* terhadap perhitungan nilai faktor, sangat bergantung pada koefisien permeabilitas material penyusun tubuh bendungan tersebut yang mempengaruhi kecepatan disipasi tekanan air pori pada tubuh bendungan. Untuk pemodelan Bendungan Nakasato, nilai koefisien permeabilitasnya yang kecil membuat air sulit terdisipasi dari tubuh

Universitas Indonesia

bendungan sehingga variasi kecepatan *drawdown* memberikan nilai tekanan air pori yang relative tidak jauh berbeda untuk tiap variasi sehingga perhitungan nilai faktor keamanan untuk tiap variasi kecepatan *drawdown* pun tidak memiliki perbedaan yang besar.

Hasil analisa faktor keamanan bendungan dengan SLOPE/W+SEEP/W mendukung teori yang telah dipaparkan sebelumnya pada referensi (Mehmet M. B., 2006), bahwa kondisi *fully rapid drawdown* merupakan kondisi ekstrim pada perhitungan stabilitas lereng yang akan menghasilkan nilai faktor keamanan lebih kecil dibandingkan dengan kondisi *transient drawdown* atau *fully slow drawdown*.

Kondisi *transient drawdown* merupakan kondisi yang umum terjadi pada tubuh bendungan, perhitungan faktor keamanan pada kondisi *transient drawdown* menghasilkan nilai faktor keamanan yang lebih realistis dibandingkan dengan hasil perhitungan pada kondisi *fully rapid drawdown* yang merupakan kondisi ekstrim dan menghasilkan nilai faktor keamanan yang lebih kecil namun dapat digunakan untuk perhitungan awal desain.

Hasil perhitungan nilai faktor keamanan bendungan homogen (1 material) dengan grafik morgenstern didapat nilai faktor keamanan sebesar 1.25 untuk kondisi *fully rapid drawdown*. Perhitungan dengan grafik Morgenstern ini menggunakan angka stabilitas 0.05 dengan perbandingan kemiringan lereng 3:1.

Dari hasil analisa menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan Bendungan Nakasato tetap memenuhi syarat nilai faktor keamanan lereng bendungan urugan, yaitu minimal 1.2 (Sosrodarsono, & Takeda. 1977), baik dalam kondisi baru dibangun maupun dalam kondisi *rapid drawdown*.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1. Kesimpulan

Dari pemodelan *rapid drawdown* yang dilakukan, kesimpulan yang dapat diambil antara lain :

1. Peristiwa *rapid drawdown* dapat mengakibatkan berkurangnya nilai faktor keamanan pada lereng suatu bendungan tanah, karena gaya hidrostatis yang menahan lereng bendungan ketika bendungan terisi penuh, kemudian menghilang dan tekanan air pori didalam tubuh bendungan yang masih tinggi mengakibatkan turunnya nilai faktor keamanan.
2. Pengaruh variasi kecepatan drawdown terhadap perhitungan nilai faktor, sangat bergantung pada koefisien permeabilitas material penyusun tubuh bendungan tersebut yang mempengaruhi kecepatan disipasi tekanan air pori pada tubuh bendungan
3. Kondisi *transient drawdown* merupakan kondisi yang umum terjadi pada tubuh bendungan, perhitungan faktor keamanan pada kondisi *transient drawdown* (metode SLOPE/W + SEEP/W) menghasilkan nilai faktor keamanan yang lebih besar tetapi memberikan informasi yang lebih realistis dibandingkan dengan hasil perhitungan pada kondisi *fully rapid drawdown* (metode SLOPE/W saja) yang merupakan kondisi ekstrim dan menghasilkan nilai faktor keamanan yang lebih kecil namun dapat digunakan pada tahap perhitungan awal desain.
4. Nilai faktor keamanan Bendungan Nakasato mengalami penurunan dari 2.204 saat bendungan penuh menjadi 1.473 saat *drawdown* (dengan SLOPE/W).
5. Nilai faktor keamanan Bendungan Nakasato yang disederhanakan menjadi 1 material mengalami penurunan dari 2.206 saat

bendungan penuh menjadi 1.514 saat *drawdown* (dengan $SLOPE/W+SEEP/W$).

6. Nilai faktor keamanan Bendungan Nakasato yang disederhanakan menjadi 2 material mengalami penurunan dari 2.356 saat bendungan penuh menjadi 1.608 saat *drawdown* (dengan $SLOPE/W+SEEP/W$).
7. Nilai faktor keamanan lereng Bendungan Nakasato terhadap peristiwa *rapid drawdown* masih memenuhi persyaratan nilai faktor keamanan minimum suatu bendungan urugan (faktor keamanan = 1.2)

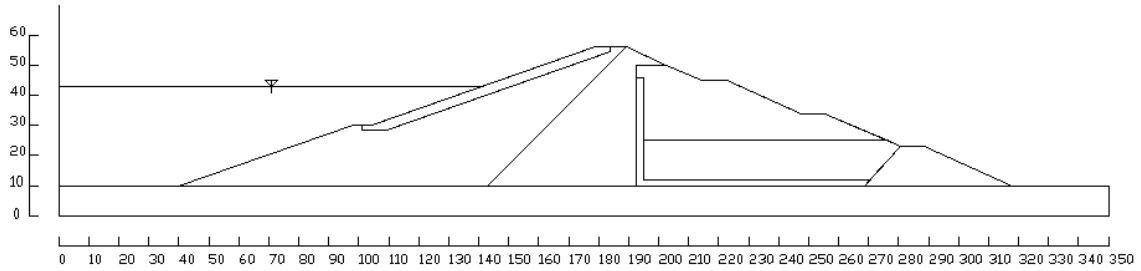
V.2. Saran

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh penulis, penulis menyarankan :

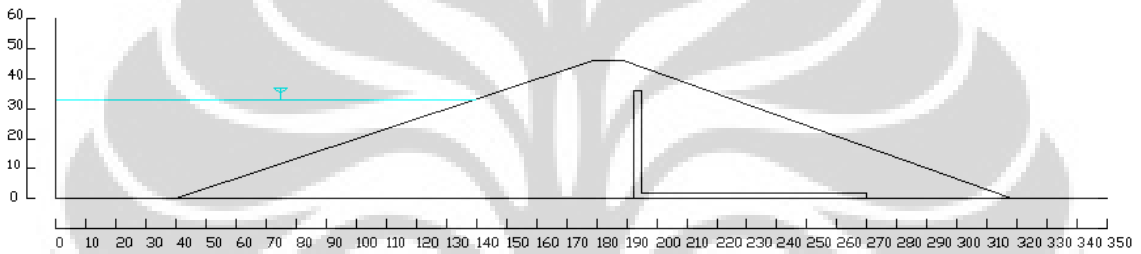
- Dalam menganalisa nilai faktor keamanan lereng bendungan terhadap *rapid drawdown*, analisa bendungan dalam kondisi *fully rapid drawdown* dapat digunakan untuk perhitungan tahap awal. Namun, perlu dilakukan analisa terhadap kondisi *transient drawdown* untuk memberikan hasil yang lebih realistis.
- Perlu dilakukan analisa keamanan lereng bendungan dengan perangkat lunak lain (misal : PLAXIS, dan lain-lain) untuk memverifikasi hasil perhitungan angka keamanan dari berbagai variasi metode perhitungan.
- Penelitian ini merekomendasikan agar dalam merancang suatu bendungan perlu dilakukan perhitungan faktor keamanan bendungan dalam kondisi *rapid drawdown*, dan agar nilai faktor keamanan bendungan tetap memenuhi syarat nilai faktor keamanan minimum suatu lereng bendungan tanah, yaitu sebesar 1.2



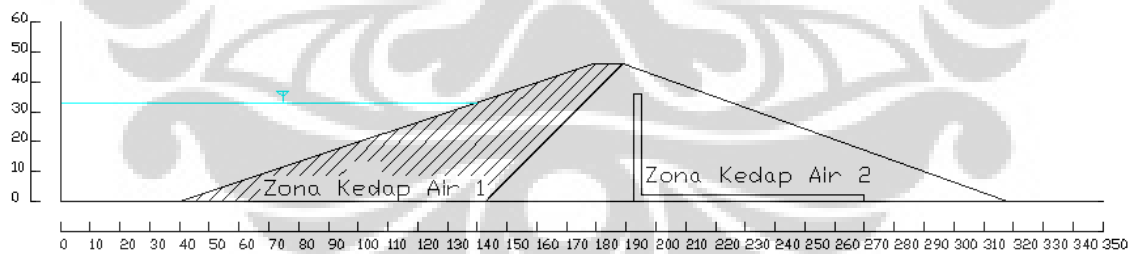
I. BENDUNGAN NAKASATO ASLI



II. BENDUNGAN PENYEDERHANAAN 1 MATERIAL



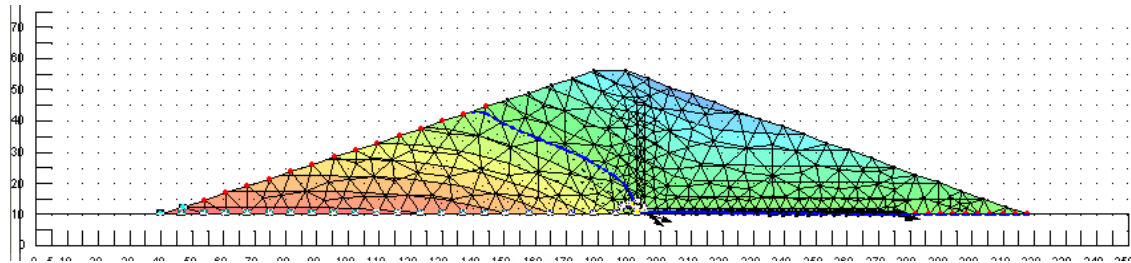
III. BENDUNGAN PENYEDERHANAAN 2 MATERIAL





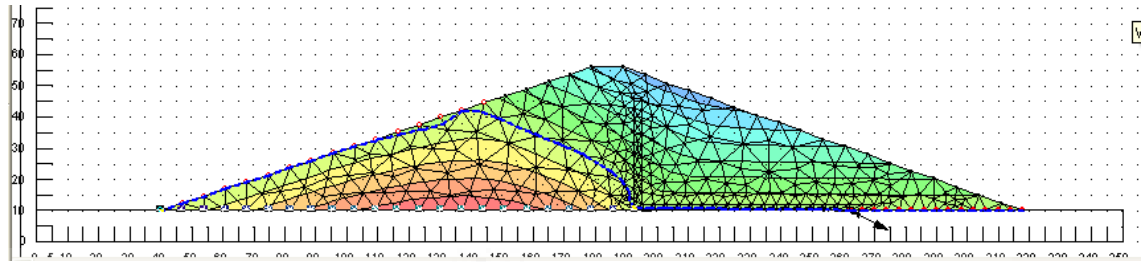
LAMPIRAN 2
TEKANAN AIR PORI
PADA TUBUH BENDUNGAN 1 MATERIAL
PADA VARIASI KECEPATAN DRAWDOWN

1. KONDISI AIR PENUH (STEADY STATE)



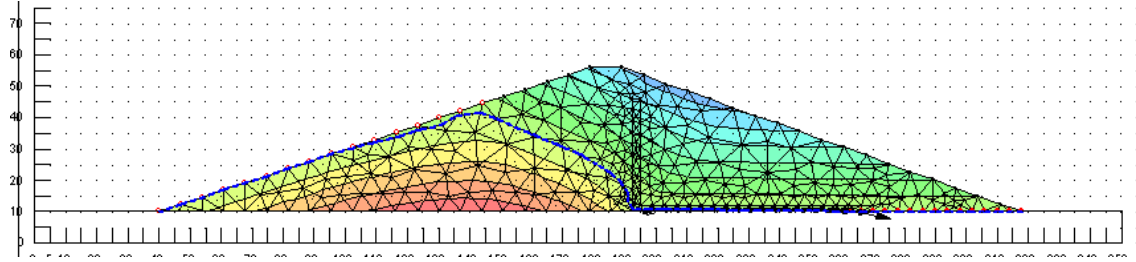
NODE	X COORDINATE	Y COORDINATE	PRESSURE0
-	---	---	---
	---	---	---
	---	---	---
1	+4.0000E+001	+1.0000E+001	+3.2363E+002
2	+4.6932E+001	+1.0000E+001	+3.2363E+002
3	+4.6950E+001	+1.2300E+001	+3.0107E+002
4	+5.3864E+001	+1.0000E+001	+3.2363E+002
6	+6.0795E+001	+1.0000E+001	+3.2361E+002
8	+6.7727E+001	+1.0000E+001	+3.2354E+002
11	+7.4659E+001	+1.0000E+001	+3.2338E+002
14	+8.1591E+001	+1.0000E+001	+3.2300E+002
17	+8.8523E+001	+1.0000E+001	+3.2231E+002
21	+9.5455E+001	+1.0000E+001	+3.2111E+002
25	+1.0239E+002	+1.0000E+001	+3.1911E+002
31	+1.0932E+002	+1.0000E+001	+3.1602E+002
36	+1.1625E+002	+1.0000E+001	+3.1146E+002
41	+1.2318E+002	+1.0000E+001	+3.0497E+002
45	+1.3011E+002	+1.0000E+001	+2.9622E+002
51	+1.3705E+002	+1.0000E+001	+2.8457E+002
56	+1.4398E+002	+1.0000E+001	+2.6967E+002
60	+1.5091E+002	+1.0000E+001	+2.5151E+002
66	+1.5784E+002	+1.0000E+001	+2.2996E+002
73	+1.6477E+002	+1.0000E+001	+2.0466E+002
79	+1.7170E+002	+1.0000E+001	+1.7489E+002
86	+1.7864E+002	+1.0000E+001	+1.3871E+002
97	+1.8557E+002	+1.0000E+001	+9.1618E+001
104	+1.8847E+002	+1.2580E+001	+3.9119E+001
115	+1.9058E+002	+1.3321E+001	+1.0306E+001
118	+1.9250E+002	+1.0000E+001	+7.5621E+000
119	+1.9250E+002	+1.3600E+001	-2.7432E+001
130	+1.9344E+002	+1.2587E+001	-1.7715E+001
141	+1.9500E+002	+1.2000E+001	-1.2150E+001

2. RAPID DRAWDOWN 1 HARI



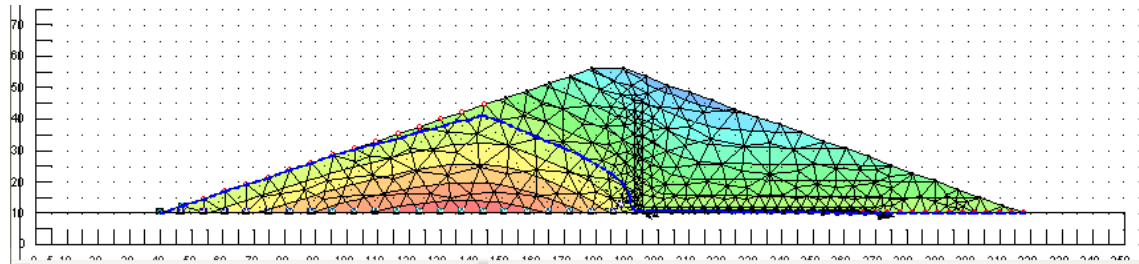
NODE	X COORDINATE	Y COORDINATE	PRESSURE1
-	---ELAPSED--	--TIME----->	+1.0000E+000
1	+4.0000E+001	+1.0000E+001	+0.0000E+000
2	+4.6932E+001	+1.0000E+001	+2.2634E+001
4	+5.3864E+001	+1.0000E+001	+4.5610E+001
6	+6.0795E+001	+1.0000E+001	+6.8813E+001
8	+6.7727E+001	+1.0000E+001	+9.2164E+001
11	+7.4659E+001	+1.0000E+001	+1.1484E+002
14	+8.1591E+001	+1.0000E+001	+1.3722E+002
17	+8.8523E+001	+1.0000E+001	+1.5868E+002
21	+9.5455E+001	+1.0000E+001	+1.7883E+002
25	+1.0239E+002	+1.0000E+001	+1.9710E+002
31	+1.0932E+002	+1.0000E+001	+2.1306E+002
36	+1.1625E+002	+1.0000E+001	+2.2634E+002
41	+1.2318E+002	+1.0000E+001	+2.3654E+002
45	+1.3011E+002	+1.0000E+001	+2.4328E+002
51	+1.3705E+002	+1.0000E+001	+2.4554E+002
56	+1.4398E+002	+1.0000E+001	+2.4246E+002
60	+1.5091E+002	+1.0000E+001	+2.3364E+002
66	+1.5784E+002	+1.0000E+001	+2.1882E+002
73	+1.6477E+002	+1.0000E+001	+1.9795E+002
79	+1.7170E+002	+1.0000E+001	+1.7109E+002
86	+1.7864E+002	+1.0000E+001	+1.3686E+002
97	+1.8557E+002	+1.0000E+001	+9.0976E+001
118	+1.9250E+002	+1.0000E+001	+7.5618E+000

3. RAPID DRAWDOWN 3 HARI



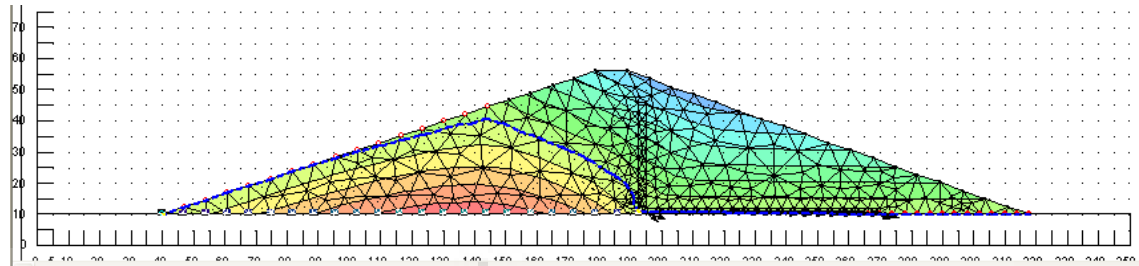
NODE	X COORDINATE	Y COORDINATE	PRESSURE2
-	---ELAPSED--	--TIME----->	+3.0000E+000
1	+4.0000E+001	+1.0000E+001	+0.0000E+000
2	+4.6932E+001	+1.0000E+001	+2.2529E+001
4	+5.3864E+001	+1.0000E+001	+4.5114E+001
6	+6.0795E+001	+1.0000E+001	+6.7677E+001
8	+6.7727E+001	+1.0000E+001	+9.0128E+001
11	+7.4659E+001	+1.0000E+001	+1.1219E+002
14	+8.1591E+001	+1.0000E+001	+1.3370E+002
17	+8.8523E+001	+1.0000E+001	+1.5439E+002
21	+9.5455E+001	+1.0000E+001	+1.7379E+002
25	+1.0239E+002	+1.0000E+001	+1.9143E+002
31	+1.0932E+002	+1.0000E+001	+2.0713E+002
36	+1.1625E+002	+1.0000E+001	+2.2055E+002
41	+1.2318E+002	+1.0000E+001	+2.3121E+002
45	+1.3011E+002	+1.0000E+001	+2.3857E+002
51	+1.3705E+002	+1.0000E+001	+2.4152E+002
56	+1.4398E+002	+1.0000E+001	+2.3917E+002
60	+1.5091E+002	+1.0000E+001	+2.3112E+002
66	+1.5784E+002	+1.0000E+001	+2.1701E+002
73	+1.6477E+002	+1.0000E+001	+1.9672E+002
79	+1.7170E+002	+1.0000E+001	+1.7031E+002
86	+1.7864E+002	+1.0000E+001	+1.3641E+002
97	+1.8557E+002	+1.0000E+001	+9.0768E+001
118	+1.9250E+002	+1.0000E+001	+7.5610E+000

4. RAPID DRAWDOWN 7 HARI



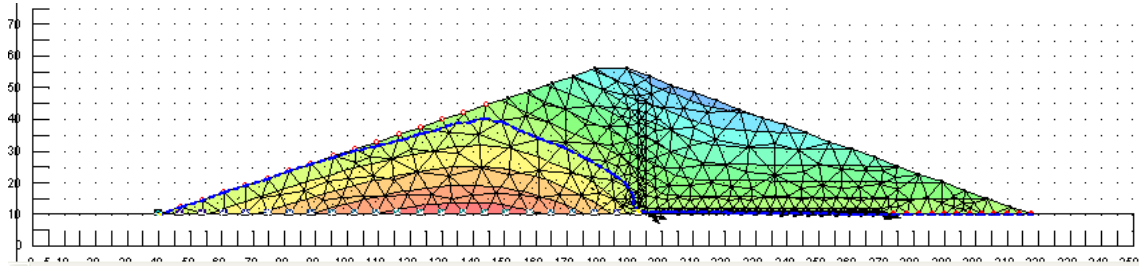
NODE	X COORDINATE	Y COORDINATE	PRESSURE3
-	---ELAPSED--	--TIME----->	+7.0000E+000
1	+4.0000E+001	+1.0000E+001	+0.0000E+000
2	+4.6932E+001	+1.0000E+001	+2.2508E+001
3	+4.6950E+001	+1.2300E+001	+0.0000E+000
4	+5.3864E+001	+1.0000E+001	+4.5026E+001
6	+6.0795E+001	+1.0000E+001	+6.7496E+001
8	+6.7727E+001	+1.0000E+001	+8.9837E+001
11	+7.4659E+001	+1.0000E+001	+1.1186E+002
14	+8.1591E+001	+1.0000E+001	+1.3329E+002
17	+8.8523E+001	+1.0000E+001	+1.5391E+002
21	+9.5455E+001	+1.0000E+001	+1.7319E+002
25	+1.0239E+002	+1.0000E+001	+1.9064E+002
31	+1.0932E+002	+1.0000E+001	+2.0614E+002
36	+1.1625E+002	+1.0000E+001	+2.1937E+002
41	+1.2318E+002	+1.0000E+001	+2.2984E+002
45	+1.3011E+002	+1.0000E+001	+2.3704E+002
51	+1.3705E+002	+1.0000E+001	+2.3991E+002
56	+1.4398E+002	+1.0000E+001	+2.3760E+002
60	+1.5091E+002	+1.0000E+001	+2.2973E+002
66	+1.5784E+002	+1.0000E+001	+2.1591E+002
73	+1.6477E+002	+1.0000E+001	+1.9594E+002
79	+1.7170E+002	+1.0000E+001	+1.6979E+002
86	+1.7864E+002	+1.0000E+001	+1.3609E+002
97	+1.8557E+002	+1.0000E+001	+9.0596E+001
104	+1.8847E+002	+1.2580E+001	+3.8583E+001
118	+1.9250E+002	+1.0000E+001	+7.5593E+000

5. RAPID DRAWDOWN 15 HARI



NODE	X COORDINATE	Y COORDINATE	PRESSURE4
-	---ELAPSED--	--TIME---->	+1.5000E+001
1	+4.0000E+001	+1.0000E+001	+0.0000E+000
2	+4.6932E+001	+1.0000E+001	+2.2501E+001
4	+5.3864E+001	+1.0000E+001	+4.5000E+001
6	+6.0795E+001	+1.0000E+001	+6.7447E+001
8	+6.7727E+001	+1.0000E+001	+8.9756E+001
11	+7.4659E+001	+1.0000E+001	+1.1174E+002
14	+8.1591E+001	+1.0000E+001	+1.3310E+002
17	+8.8523E+001	+1.0000E+001	+1.5357E+002
21	+9.5455E+001	+1.0000E+001	+1.7264E+002
25	+1.0239E+002	+1.0000E+001	+1.8985E+002
31	+1.0932E+002	+1.0000E+001	+2.0511E+002
36	+1.1625E+002	+1.0000E+001	+2.1813E+002
41	+1.2318E+002	+1.0000E+001	+2.2843E+002
45	+1.3011E+002	+1.0000E+001	+2.3551E+002
51	+1.3705E+002	+1.0000E+001	+2.3830E+002
56	+1.4398E+002	+1.0000E+001	+2.3600E+002
60	+1.5091E+002	+1.0000E+001	+2.2825E+002
66	+1.5784E+002	+1.0000E+001	+2.1469E+002
73	+1.6477E+002	+1.0000E+001	+1.9504E+002
79	+1.7170E+002	+1.0000E+001	+1.6917E+002
86	+1.7864E+002	+1.0000E+001	+1.3569E+002
97	+1.8557E+002	+1.0000E+001	+9.0382E+001
118	+1.9250E+002	+1.0000E+001	+7.5553E+000

6. RAPID DRAWDOWN 30 HARI

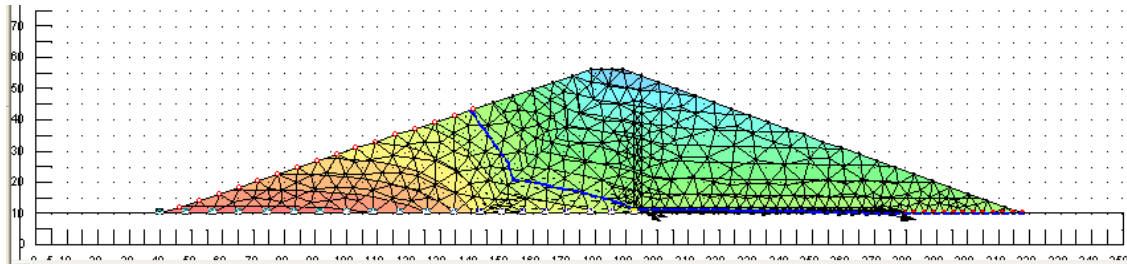


NODE	X COORDINATE	Y COORDINATE	PRESSURE5
-	---	ELAPSED--	--TIME-----> +3.0000E+001
1	+4.0000E+001	+1.0000E+001	+0.0000E+000
2	+4.6932E+001	+1.0000E+001	+2.2499E+001
4	+5.3864E+001	+1.0000E+001	+4.4990E+001
6	+6.0795E+001	+1.0000E+001	+6.7425E+001
8	+6.7727E+001	+1.0000E+001	+8.9714E+001
11	+7.4659E+001	+1.0000E+001	+1.1166E+002
14	+8.1591E+001	+1.0000E+001	+1.3291E+002
17	+8.8523E+001	+1.0000E+001	+1.5321E+002
21	+9.5455E+001	+1.0000E+001	+1.7203E+002
25	+1.0239E+002	+1.0000E+001	+1.8896E+002
31	+1.0932E+002	+1.0000E+001	+2.0396E+002
36	+1.1625E+002	+1.0000E+001	+2.1675E+002
41	+1.2318E+002	+1.0000E+001	+2.2685E+002
45	+1.3011E+002	+1.0000E+001	+2.3375E+002
51	+1.3705E+002	+1.0000E+001	+2.3642E+002
56	+1.4398E+002	+1.0000E+001	+2.3410E+002
60	+1.5091E+002	+1.0000E+001	+2.2647E+002
66	+1.5784E+002	+1.0000E+001	+2.1319E+002
73	+1.6477E+002	+1.0000E+001	+1.9391E+002
79	+1.7170E+002	+1.0000E+001	+1.6838E+002
86	+1.7864E+002	+1.0000E+001	+1.3518E+002
97	+1.8557E+002	+1.0000E+001	+9.0104E+001
118	+1.9250E+002	+1.0000E+001	+7.5414E+000



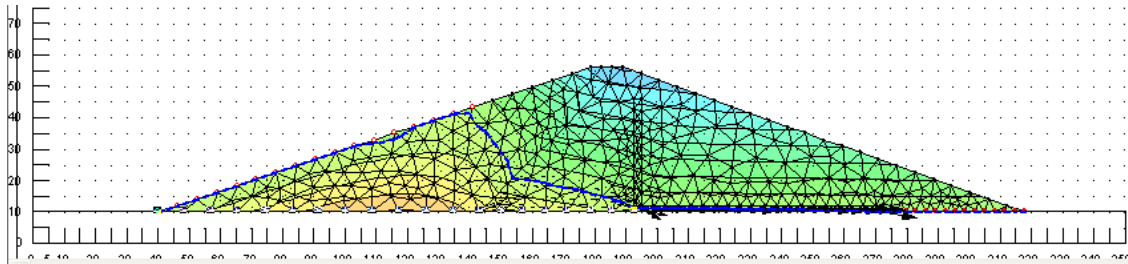
LAMPIRAN 3
TEKANAN AIR PORI
PADA TUBUH BENDUNGAN 2 MATERIAL
PADA VARIASI KECEPATAN DRAWDOWN

1. KONDISI AIR PENUH (STEADY STATE)



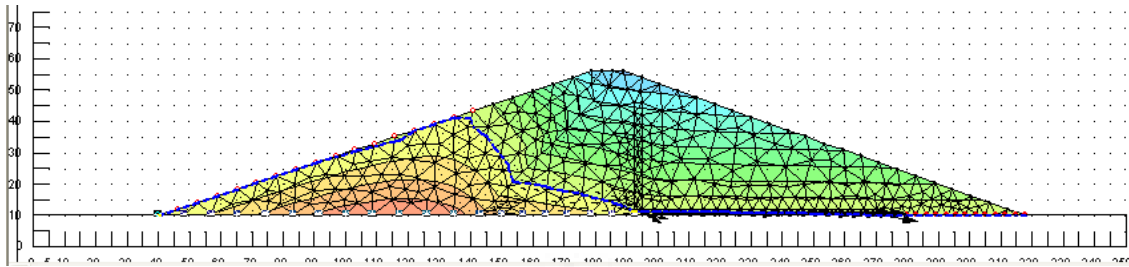
NODE	X COORDINATE	Y COORDINATE	PRESSURE0
-	ELAPSED	TIME	> +0.0000E+000
1	+4.0000E+001	+1.0000E+001	+3.2363E+002
3	+4.8583E+001	+1.0000E+001	+3.2363E+002
5	+5.7167E+001	+1.0000E+001	+3.2361E+002
9	+6.5750E+001	+1.0000E+001	+3.2346E+002
12	+7.4333E+001	+1.0000E+001	+3.2292E+002
18	+8.2917E+001	+1.0000E+001	+3.2143E+002
26	+9.1500E+001	+1.0000E+001	+3.1817E+002
33	+1.0008E+002	+1.0000E+001	+3.1192E+002
40	+1.0867E+002	+1.0000E+001	+3.0061E+002
48	+1.1725E+002	+1.0000E+001	+2.8278E+002
59	+1.2583E+002	+1.0000E+001	+2.5442E+002
65	+1.3442E+002	+1.0000E+001	+2.0894E+002
78	+1.4300E+002	+1.0000E+001	+1.2707E+002
87	+1.5007E+002	+1.0000E+001	+1.1204E+002
100	+1.5714E+002	+1.0000E+001	+1.0049E+002
108	+1.6421E+002	+1.0000E+001	+8.8461E+001
122	+1.7129E+002	+1.0000E+001	+7.5053E+001
131	+1.7836E+002	+1.0000E+001	+5.9536E+001
143	+1.8543E+002	+1.0000E+001	+4.0573E+001
163	+1.9250E+002	+1.0000E+001	+1.3109E+001

2. RAPID DRAWDOWN 1 HARI



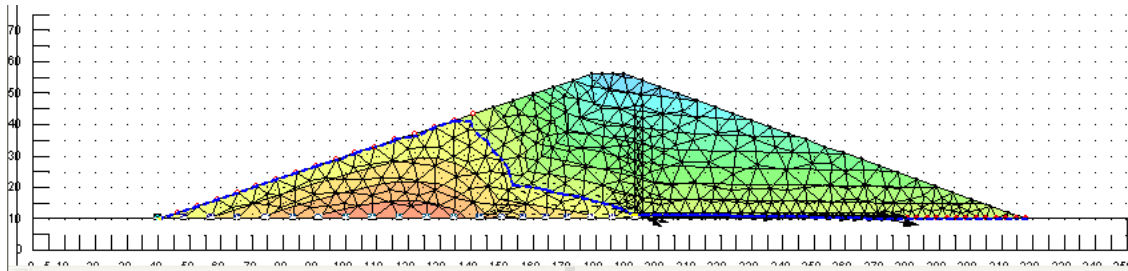
NODE	X COORDINATE	Y COORDINATE	PRESSURE1
-	---ELAPSED--	--TIME----->	+1.0000E+000
1	+4.0000E+001	+1.0000E+001	+0.0000E+000
3	+4.8583E+001	+1.0000E+001	+2.8117E+001
5	+5.7167E+001	+1.0000E+001	+5.6740E+001
9	+6.5750E+001	+1.0000E+001	+8.5275E+001
12	+7.4333E+001	+1.0000E+001	+1.1342E+002
18	+8.2917E+001	+1.0000E+001	+1.4018E+002
26	+9.1500E+001	+1.0000E+001	+1.6438E+002
33	+1.0008E+002	+1.0000E+001	+1.8455E+002
40	+1.0867E+002	+1.0000E+001	+1.9854E+002
48	+1.1725E+002	+1.0000E+001	+2.0524E+002
59	+1.2583E+002	+1.0000E+001	+2.0073E+002
65	+1.3442E+002	+1.0000E+001	+1.7806E+002
78	+1.4300E+002	+1.0000E+001	+1.2117E+002
87	+1.5007E+002	+1.0000E+001	+1.0963E+002
100	+1.5714E+002	+1.0000E+001	+9.9559E+001
108	+1.6421E+002	+1.0000E+001	+8.8138E+001
122	+1.7129E+002	+1.0000E+001	+7.4984E+001
131	+1.7836E+002	+1.0000E+001	+5.9520E+001
143	+1.8543E+002	+1.0000E+001	+4.0571E+001
163	+1.9250E+002	+1.0000E+001	+1.3109E+001

3. RAPID DRAWDOWN 3 HARI



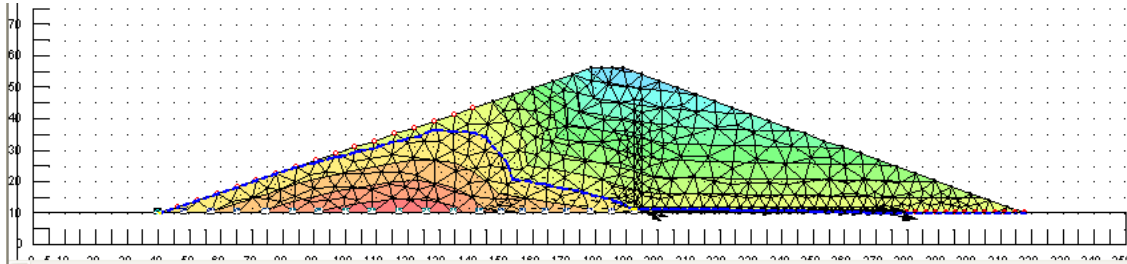
NODE	X COORDINATE	Y COORDINATE	PRESSURE2
-	---ELAPSED--	--TIME----->	+3.0000E+000
1	+4.0000E+001	+1.0000E+001	+0.0000E+000
3	+4.8583E+001	+1.0000E+001	+2.7919E+001
5	+5.7167E+001	+1.0000E+001	+5.5899E+001
9	+6.5750E+001	+1.0000E+001	+8.3663E+001
12	+7.4333E+001	+1.0000E+001	+1.1086E+002
18	+8.2917E+001	+1.0000E+001	+1.3674E+002
26	+9.1500E+001	+1.0000E+001	+1.6030E+002
33	+1.0008E+002	+1.0000E+001	+1.8027E+002
40	+1.0867E+002	+1.0000E+001	+1.9466E+002
48	+1.1725E+002	+1.0000E+001	+2.0204E+002
59	+1.2583E+002	+1.0000E+001	+1.9809E+002
65	+1.3442E+002	+1.0000E+001	+1.7608E+002
78	+1.4300E+002	+1.0000E+001	+1.2037E+002
87	+1.5007E+002	+1.0000E+001	+1.0904E+002
100	+1.5714E+002	+1.0000E+001	+9.9193E+001
108	+1.6421E+002	+1.0000E+001	+8.7958E+001
122	+1.7129E+002	+1.0000E+001	+7.4914E+001
131	+1.7836E+002	+1.0000E+001	+5.9503E+001
143	+1.8543E+002	+1.0000E+001	+4.0568E+001
163	+1.9250E+002	+1.0000E+001	+1.3109E+001

4. RAPID DRAWDOWN 7 HARI



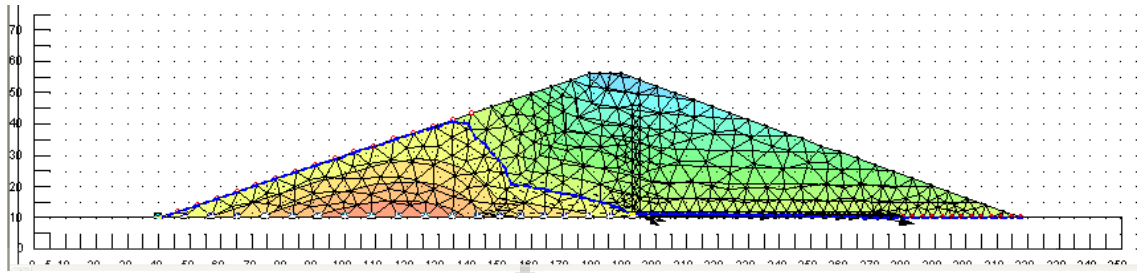
NODE	X COORDINATE --ELAPSED--	Y COORDINATE --TIME----->	PRESSURE3 +7.0000E+000
1	+4.0000E+001	+1.0000E+001	+0.0000E+000
3	+4.8583E+001	+1.0000E+001	+2.7879E+001
5	+5.7167E+001	+1.0000E+001	+5.5758E+001
9	+6.5750E+001	+1.0000E+001	+8.3464E+001
12	+7.4333E+001	+1.0000E+001	+1.1071E+002
18	+8.2917E+001	+1.0000E+001	+1.3687E+002
26	+9.1500E+001	+1.0000E+001	+1.6104E+002
33	+1.0008E+002	+1.0000E+001	+1.8189E+002
40	+1.0867E+002	+1.0000E+001	+1.9704E+002
48	+1.1725E+002	+1.0000E+001	+2.0468E+002
59	+1.2583E+002	+1.0000E+001	+2.0017E+002
65	+1.3442E+002	+1.0000E+001	+1.7707E+002
78	+1.4300E+002	+1.0000E+001	+1.2021E+002
87	+1.5007E+002	+1.0000E+001	+1.0876E+002
100	+1.5714E+002	+1.0000E+001	+9.8951E+001
108	+1.6421E+002	+1.0000E+001	+8.7802E+001
122	+1.7129E+002	+1.0000E+001	+7.4838E+001
131	+1.7836E+002	+1.0000E+001	+5.9479E+001
143	+1.8543E+002	+1.0000E+001	+4.0563E+001
163	+1.9250E+002	+1.0000E+001	+1.3109E+001

5. RAPID DRAWDOWN 15 HARI



NODE	X COORDINATE --ELAPSED--	Y COORDINATE --TIME----->	PRESSURE4 +1.5000E+001
1	+4.0000E+001	+1.0000E+001	+0.0000E+000
3	+4.8583E+001	+1.0000E+001	+2.7867E+001
5	+5.7167E+001	+1.0000E+001	+5.5696E+001
9	+6.5750E+001	+1.0000E+001	+8.3211E+001
12	+7.4333E+001	+1.0000E+001	+1.0980E+002
18	+8.2917E+001	+1.0000E+001	+1.3427E+002
26	+9.1500E+001	+1.0000E+001	+1.5553E+002
33	+1.0008E+002	+1.0000E+001	+1.7315E+002
40	+1.0867E+002	+1.0000E+001	+1.8601E+002
48	+1.1725E+002	+1.0000E+001	+1.9283E+002
59	+1.2583E+002	+1.0000E+001	+1.8940E+002
65	+1.3442E+002	+1.0000E+001	+1.6937E+002
78	+1.4300E+002	+1.0000E+001	+1.1796E+002
87	+1.5007E+002	+1.0000E+001	+1.0743E+002
100	+1.5714E+002	+1.0000E+001	+9.8182E+001
108	+1.6421E+002	+1.0000E+001	+8.7384E+001
122	+1.7129E+002	+1.0000E+001	+7.4650E+001
131	+1.7836E+002	+1.0000E+001	+5.9413E+001
143	+1.8543E+002	+1.0000E+001	+4.0544E+001
163	+1.9250E+002	+1.0000E+001	+1.3108E+001

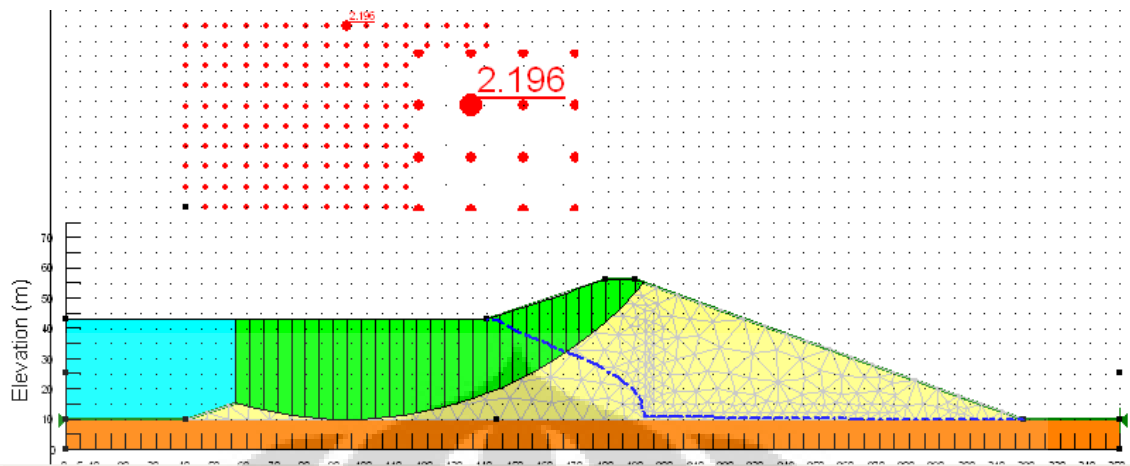
6. RAPID DRAWDOWN 30 HARI



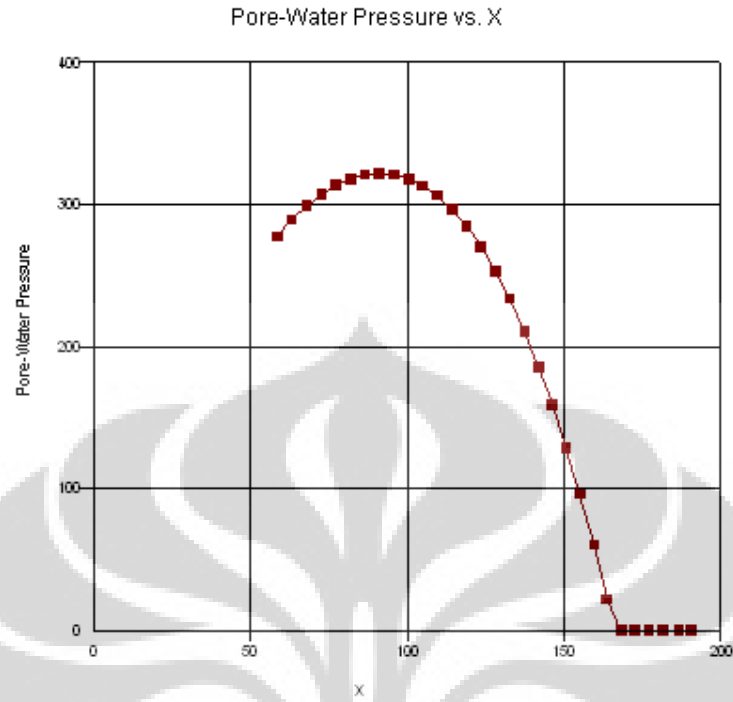
NODE	X COORDINATE	Y COORDINATE	PRESSURE5
-	---ELAPSED---	--TIME---->	+3.0000E+001
1	+4.0000E+001	+1.0000E+001	+0.0000E+000
3	+4.8583E+001	+1.0000E+001	+2.7862E+001
5	+5.7167E+001	+1.0000E+001	+5.5702E+001
9	+6.5750E+001	+1.0000E+001	+8.3379E+001
12	+7.4333E+001	+1.0000E+001	+1.1057E+002
18	+8.2917E+001	+1.0000E+001	+1.3660E+002
26	+9.1500E+001	+1.0000E+001	+1.6049E+002
33	+1.0008E+002	+1.0000E+001	+1.8088E+002
40	+1.0867E+002	+1.0000E+001	+1.9546E+002
48	+1.1725E+002	+1.0000E+001	+2.0249E+002
59	+1.2583E+002	+1.0000E+001	+1.9747E+002
65	+1.3442E+002	+1.0000E+001	+1.7439E+002
78	+1.4300E+002	+1.0000E+001	+1.1873E+002
87	+1.5007E+002	+1.0000E+001	+1.0759E+002
100	+1.5714E+002	+1.0000E+001	+9.8093E+001
108	+1.6421E+002	+1.0000E+001	+8.7238E+001
122	+1.7129E+002	+1.0000E+001	+7.4528E+001
131	+1.7836E+002	+1.0000E+001	+5.9342E+001
143	+1.8543E+002	+1.0000E+001	+4.0513E+001
163	+1.9250E+002	+1.0000E+001	+1.3106E+001



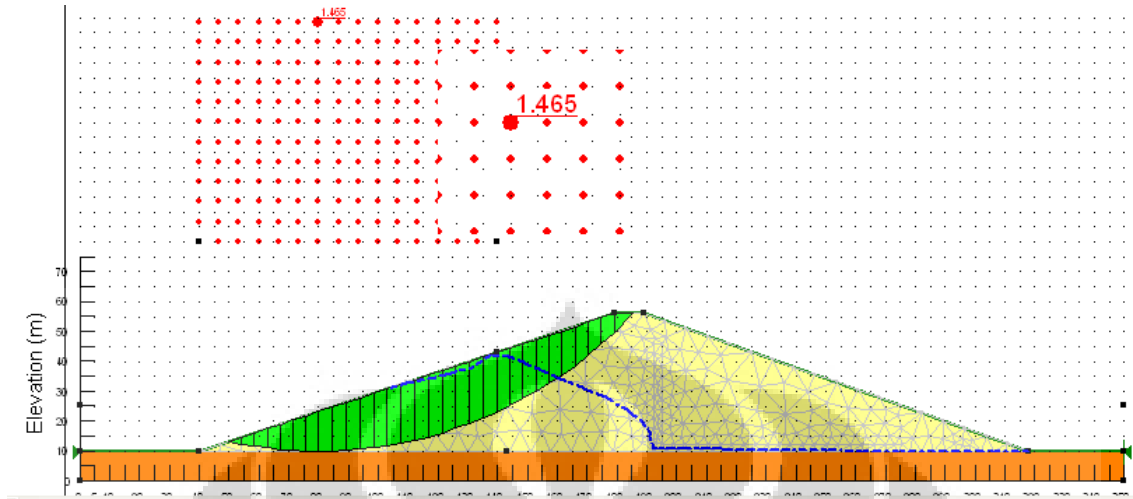
1. KONDISI AIR PENUH (STEADY STATE)



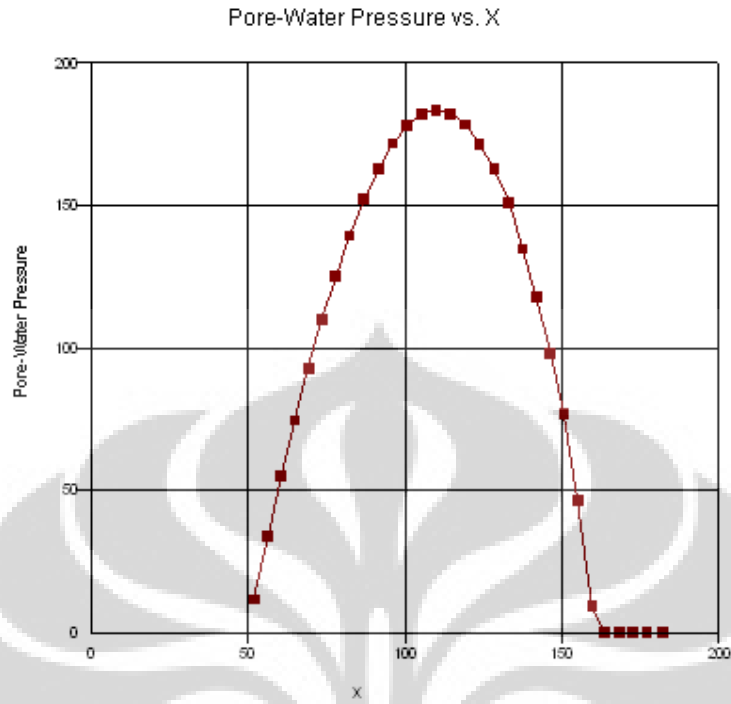
PT #	X-COORDINATE	P.W.P.
1	+5.8602E+001	+2.7729E+002
2	+6.3233E+001	+2.8894E+002
3	+6.7864E+001	+2.9886E+002
4	+7.2495E+001	+3.0697E+002
5	+7.7126E+001	+3.1332E+002
6	+8.1756E+001	+3.1793E+002
7	+8.6387E+001	+3.2070E+002
8	+9.1018E+001	+3.2167E+002
9	+9.5652E+001	+3.2085E+002
10	+1.0029E+002	+3.1790E+002
11	+1.0493E+002	+3.1294E+002
12	+1.0957E+002	+3.0598E+002
13	+1.1420E+002	+2.9650E+002
14	+1.1884E+002	+2.8470E+002
15	+1.2348E+002	+2.7024E+002
16	+1.2812E+002	+2.5312E+002
17	+1.3275E+002	+2.3352E+002
18	+1.3739E+002	+2.1031E+002
19	+1.4189E+002	+1.8574E+002
20	+1.4626E+002	+1.5845E+002
21	+1.5062E+002	+1.2844E+002
22	+1.5499E+002	+9.5596E+001
23	+1.5936E+002	+6.0064E+001
24	+1.6372E+002	+2.1872E+001
25	+1.6809E+002	+0.0000E+000
26	+1.7245E+002	+0.0000E+000
27	+1.7682E+002	+0.0000E+000
28	+1.8150E+002	+0.0000E+000
29	+1.8650E+002	+0.0000E+000
30	+1.9036E+002	+0.0000E+000



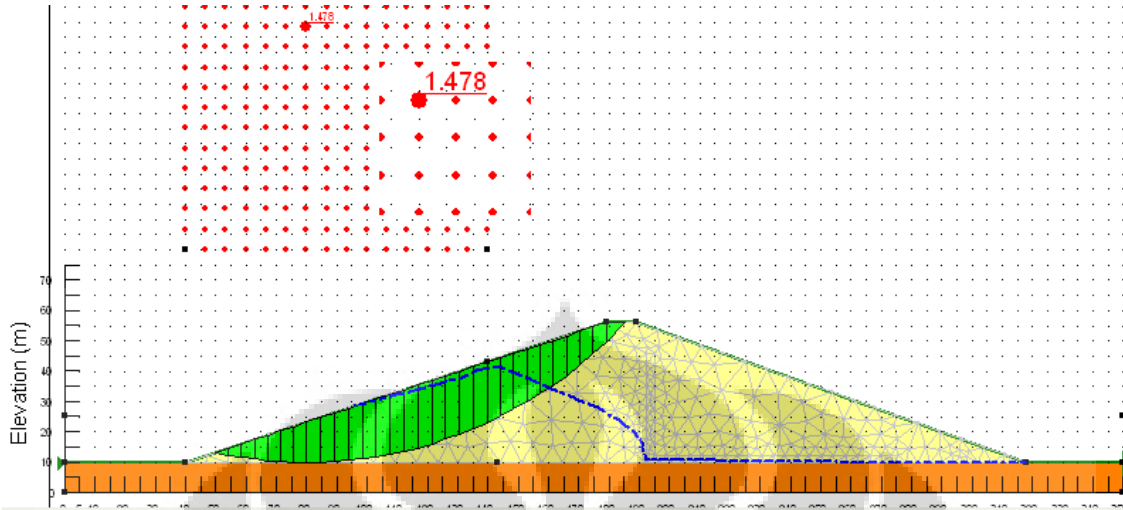
2. RAPID DRAWDOWN 1 HARI



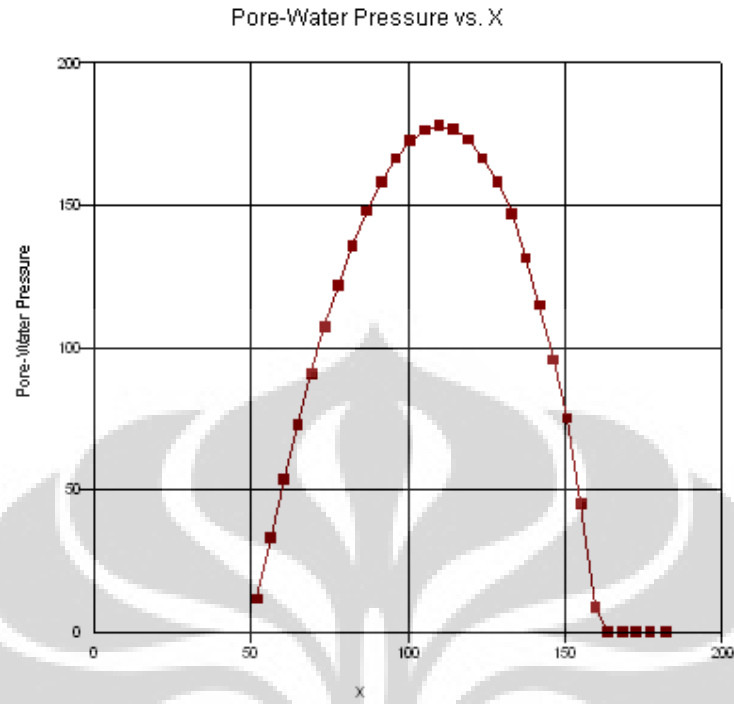
PT #	X-COORDINATE	P.W.P.
1	+5.1913E+001	+1.1570E+001
2	+5.6234E+001	+3.3821E+001
3	+6.0555E+001	+5.4770E+001
4	+6.4876E+001	+7.4561E+001
5	+6.9197E+001	+9.2927E+001
6	+7.3518E+001	+1.0966E+002
7	+7.7839E+001	+1.2495E+002
8	+8.2297E+001	+1.3923E+002
9	+8.6890E+001	+1.5200E+002
10	+9.1483E+001	+1.6278E+002
11	+9.6076E+001	+1.7167E+002
12	+1.0067E+002	+1.7800E+002
13	+1.0526E+002	+1.8200E+002
14	+1.0985E+002	+1.8355E+002
15	+1.1445E+002	+1.8223E+002
16	+1.1904E+002	+1.7849E+002
17	+1.2363E+002	+1.7148E+002
18	+1.2823E+002	+1.6269E+002
19	+1.3282E+002	+1.5092E+002
20	+1.3741E+002	+1.3482E+002
21	+1.4189E+002	+1.1788E+002
22	+1.4626E+002	+9.7998E+001
23	+1.5062E+002	+7.6690E+001
24	+1.5499E+002	+4.6255E+001
25	+1.5936E+002	+8.9274E+000
26	+1.6372E+002	+0.0000E+000
27	+1.6809E+002	+0.0000E+000
28	+1.7245E+002	+0.0000E+000
29	+1.7682E+002	+0.0000E+000
30	+1.8211E+002	+0.0000E+000



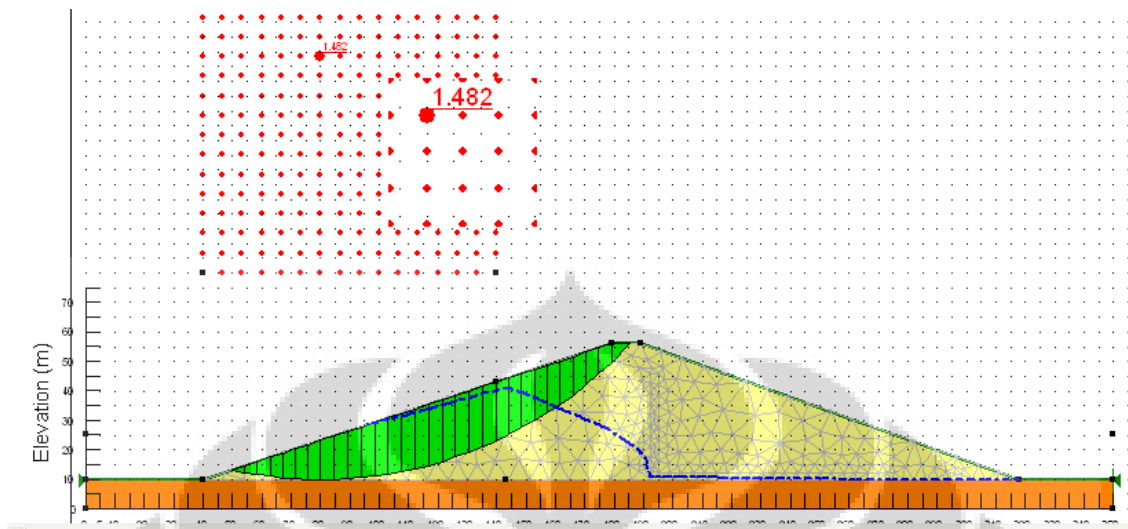
3. RAPID DRAWDOWN 3 HARI



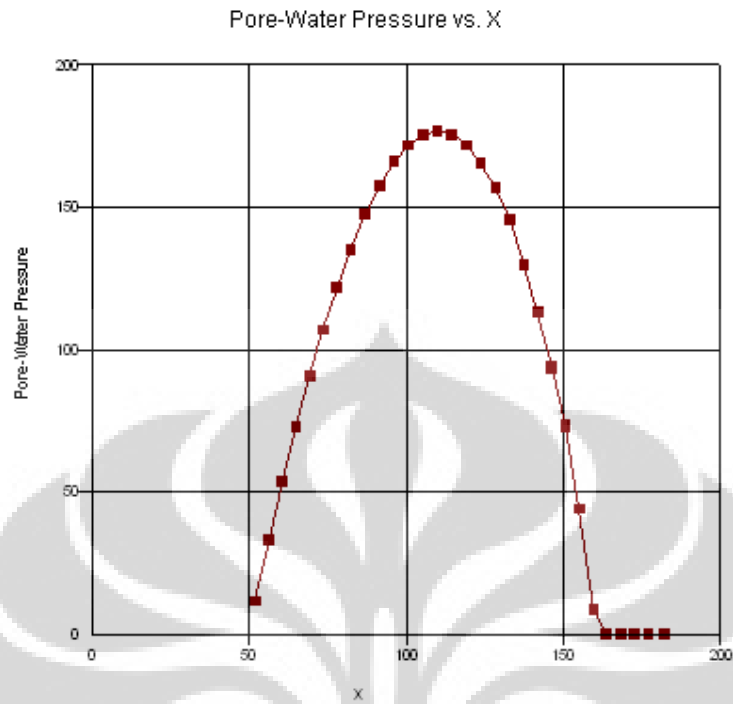
PT #	X-COORDINATE	P.W.P.
1	+5.1913E+001	+1.1444E+001
2	+5.6234E+001	+3.3322E+001
3	+6.0555E+001	+5.3864E+001
4	+6.4876E+001	+7.3026E+001
5	+6.9197E+001	+9.0816E+001
6	+7.3518E+001	+1.0712E+002
7	+7.7839E+001	+1.2190E+002
8	+8.2297E+001	+1.3563E+002
9	+8.6890E+001	+1.4790E+002
10	+9.1483E+001	+1.5820E+002
11	+9.6076E+001	+1.6663E+002
12	+1.0067E+002	+1.7257E+002
13	+1.0526E+002	+1.7630E+002
14	+1.0985E+002	+1.7776E+002
15	+1.1445E+002	+1.7655E+002
16	+1.1904E+002	+1.7305E+002
17	+1.2363E+002	+1.6650E+002
18	+1.2823E+002	+1.5819E+002
19	+1.3282E+002	+1.4696E+002
20	+1.3741E+002	+1.3131E+002
21	+1.4189E+002	+1.1478E+002
22	+1.4626E+002	+9.5571E+001
23	+1.5062E+002	+7.5018E+001
24	+1.5499E+002	+4.5289E+001
25	+1.5936E+002	+8.7042E+000
26	+1.6372E+002	+0.0000E+000
27	+1.6809E+002	+0.0000E+000
28	+1.7245E+002	+0.0000E+000
29	+1.7682E+002	+0.0000E+000
30	+1.8211E+002	+0.0000E+000



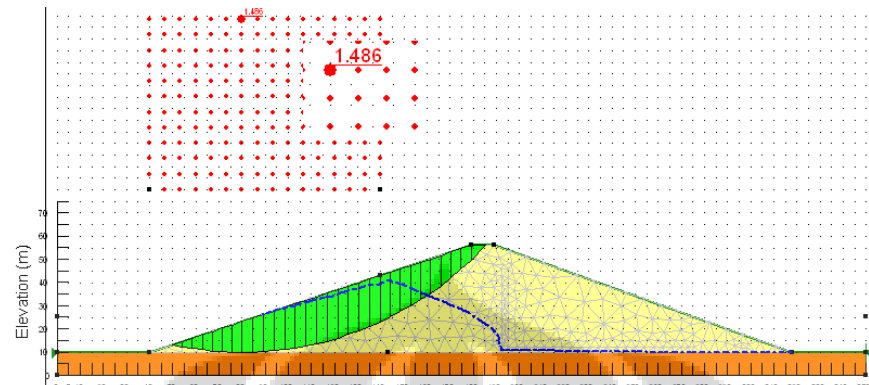
4. RAPID DRAWDOWN 7 HARI



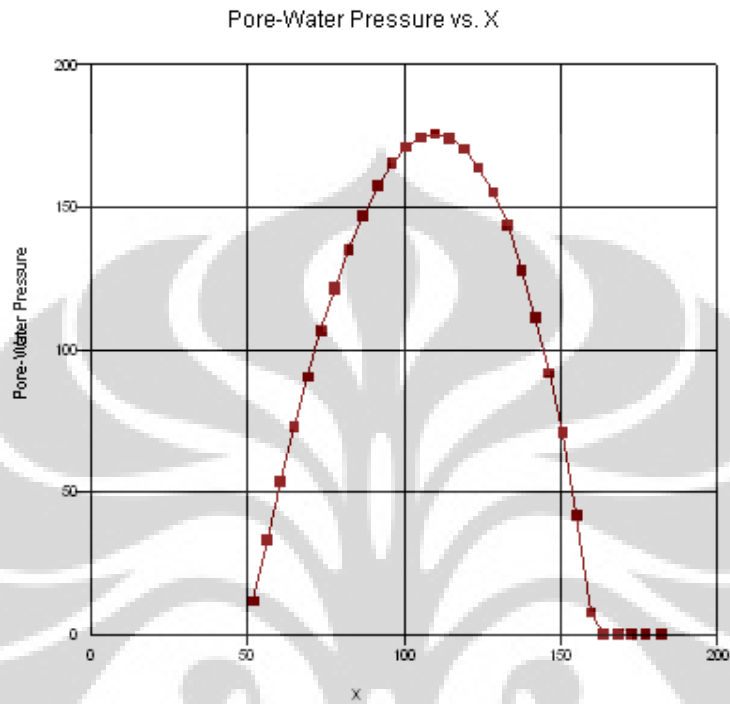
PT #	X-COORDINATE	P.W.P.
1	+5.1913E+001	+1.1421E+001
2	+5.6234E+001	+3.3242E+001
3	+6.0555E+001	+5.3722E+001
4	+6.4876E+001	+7.2803E+001
5	+6.9197E+001	+9.0523E+001
6	+7.3518E+001	+1.0680E+002
7	+7.7839E+001	+1.2153E+002
8	+8.2297E+001	+1.3521E+002
9	+8.6890E+001	+1.4744E+002
10	+9.1483E+001	+1.5767E+002
11	+9.6076E+001	+1.6601E+002
12	+1.0067E+002	+1.7184E+002
13	+1.0526E+002	+1.7544E+002
14	+1.0985E+002	+1.7676E+002
15	+1.1445E+002	+1.7542E+002
16	+1.1904E+002	+1.7180E+002
17	+1.2363E+002	+1.6513E+002
18	+1.2823E+002	+1.5668E+002
19	+1.3282E+002	+1.4531E+002
20	+1.3741E+002	+1.2954E+002
21	+1.4189E+002	+1.1287E+002
22	+1.4626E+002	+9.3629E+001
23	+1.5062E+002	+7.3061E+001
24	+1.5499E+002	+4.3788E+001
25	+1.5936E+002	+8.2728E+000
26	+1.6372E+002	+0.0000E+000
27	+1.6809E+002	+0.0000E+000
28	+1.7245E+002	+0.0000E+000
29	+1.7682E+002	+0.0000E+000
30	+1.8211E+002	+0.0000E+000



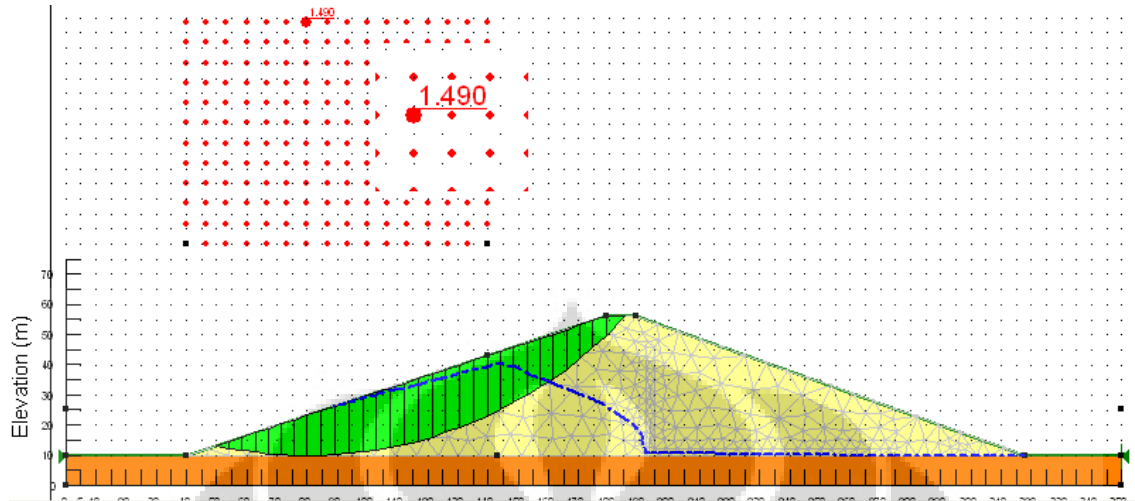
5. RAPID DRAWDOWN 15 HARI



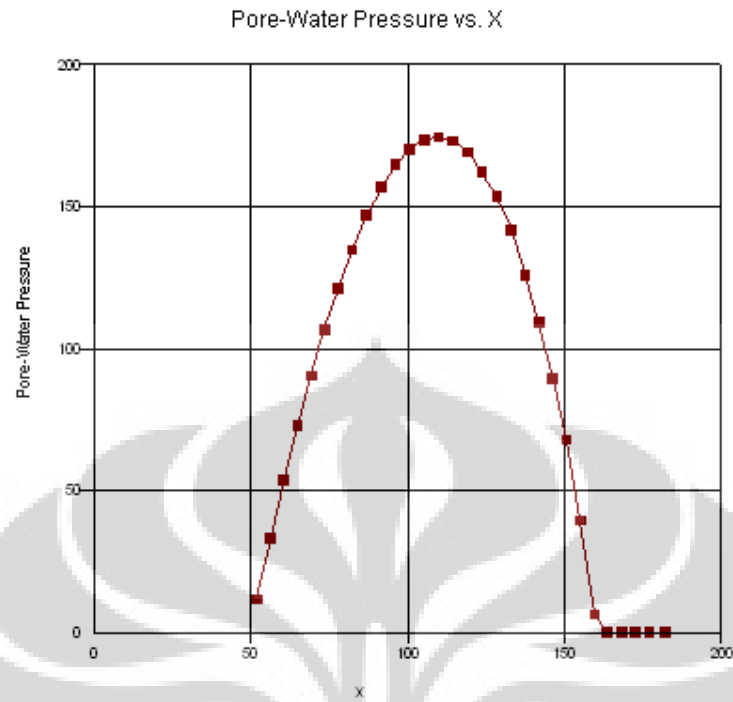
PT #	X-COORDINATE	P.W.P.
1	+5.1913E+001	+1.1415E+001
2	+5.6234E+001	+3.3219E+001
3	+6.0555E+001	+5.3683E+001
4	+6.4876E+001	+7.2741E+001
5	+6.9197E+001	+9.0437E+001
6	+7.3518E+001	+1.0669E+002
7	+7.7839E+001	+1.2138E+002
8	+8.2297E+001	+1.3501E+002
9	+8.6890E+001	+1.4714E+002
10	+9.1483E+001	+1.5725E+002
11	+9.6076E+001	+1.6544E+002
12	+1.0067E+002	+1.7111E+002
13	+1.0526E+002	+1.7454E+002
14	+1.0985E+002	+1.7571E+002
15	+1.1445E+002	+1.7423E+002
16	+1.1904E+002	+1.7048E+002
17	+1.2363E+002	+1.6370E+002
18	+1.2823E+002	+1.5514E+002
19	+1.3282E+002	+1.4368E+002
20	+1.3741E+002	+1.2782E+002
21	+1.4189E+002	+1.1104E+002
22	+1.4626E+002	+9.1543E+001
23	+1.5062E+002	+7.0629E+001
24	+1.5499E+002	+4.1750E+001
25	+1.5936E+002	+7.5186E+000
26	+1.6372E+002	+0.0000E+000
27	+1.6809E+002	+0.0000E+000
28	+1.7245E+002	+0.0000E+000
29	+1.7682E+002	+0.0000E+000
30	+1.8211E+002	+0.0000E+000



6. RAPID DRAWDOWN 30 HARI

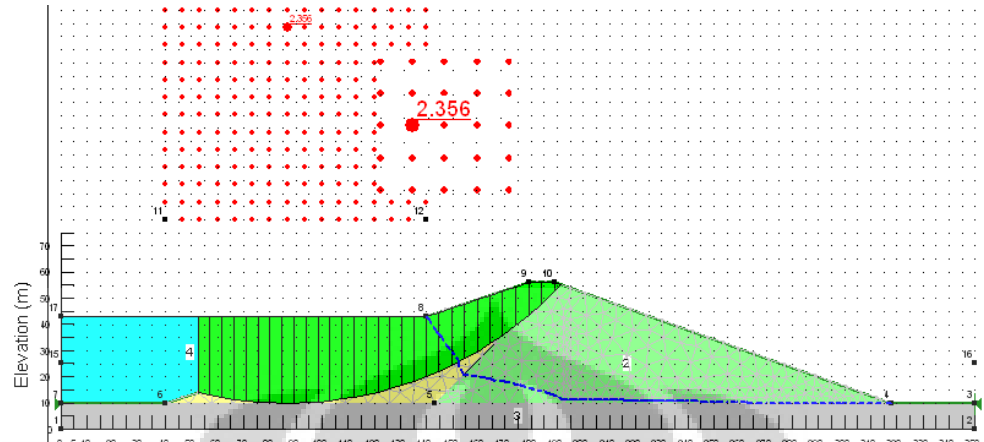


PT #	X-COORDINATE	P.W.P.
1	+5.1913E+001	+1.1412E+001
2	+5.6234E+001	+3.3207E+001
3	+6.0555E+001	+5.3665E+001
4	+6.4876E+001	+7.2708E+001
5	+6.9197E+001	+9.0386E+001
6	+7.3518E+001	+1.0662E+002
7	+7.7839E+001	+1.2125E+002
8	+8.2297E+001	+1.3480E+002
9	+8.6890E+001	+1.4682E+002
10	+9.1483E+001	+1.5679E+002
11	+9.6076E+001	+1.6480E+002
12	+1.0067E+002	+1.7029E+002
13	+1.0526E+002	+1.7354E+002
14	+1.0985E+002	+1.7453E+002
15	+1.1445E+002	+1.7290E+002
16	+1.1904E+002	+1.6901E+002
17	+1.2363E+002	+1.6209E+002
18	+1.2823E+002	+1.5339E+002
19	+1.3282E+002	+1.4179E+002
20	+1.3741E+002	+1.2580E+002
21	+1.4189E+002	+1.0887E+002
22	+1.4626E+002	+8.9081E+001
23	+1.5062E+002	+6.7787E+001
24	+1.5499E+002	+3.9284E+001
25	+1.5936E+002	+6.3487E+000
26	+1.6372E+002	+0.0000E+000
27	+1.6809E+002	+0.0000E+000
28	+1.7245E+002	+0.0000E+000
29	+1.7682E+002	+0.0000E+000
30	+1.8211E+002	+0.0000E+000





1. KONDISI AIR PENUH (STEADY STATE)

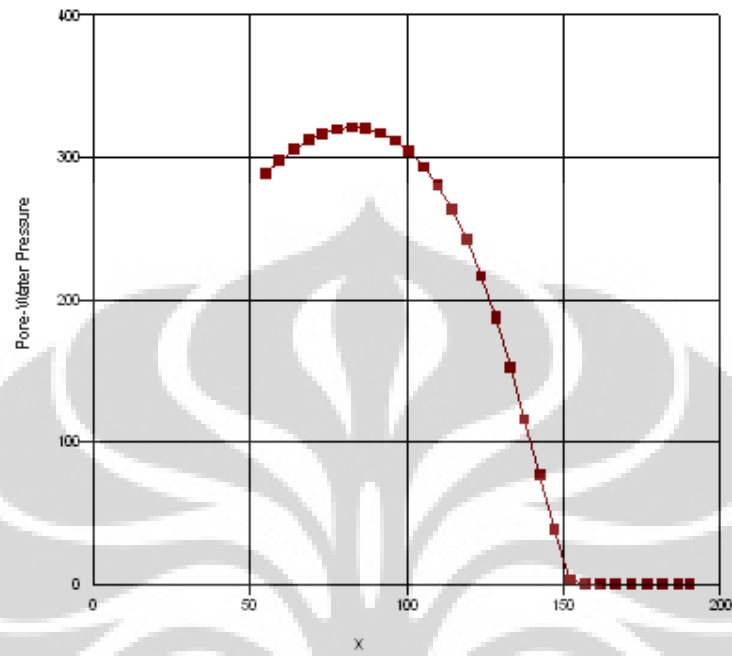


PT #	X-COORDINATE	P.W.P.
1	+5.4786E+001	+2.8843E+002
2	+5.9377E+001	+2.9789E+002
3	+6.3967E+001	+3.0578E+002
4	+6.8558E+001	+3.1205E+002
5	+7.3148E+001	+3.1675E+002
6	+7.7739E+001	+3.1961E+002
7	+8.2329E+001	+3.2089E+002
8	+8.6919E+001	+3.1991E+002
9	+9.1510E+001	+3.1735E+002
10	+9.6100E+001	+3.1183E+002
11	+1.0069E+002	+3.0454E+002
12	+1.0528E+002	+2.9348E+002
13	+1.0987E+002	+2.8026E+002
14	+1.1446E+002	+2.6302E+002
15	+1.1905E+002	+2.4167E+002
16	+1.2364E+002	+2.1629E+002
17	+1.2823E+002	+1.8719E+002
18	+1.3282E+002	+1.5184E+002
19	+1.3741E+002	+1.1601E+002
20	+1.4215E+002	+7.6716E+001
21	+1.4704E+002	+3.8584E+001
22	+1.5192E+002	+2.8469E+000
23	+1.5681E+002	+0.0000E+000
24	+1.6169E+002	+0.0000E+000
25	+1.6658E+002	+0.0000E+000
26	+1.7152E+002	+0.0000E+000
27	+1.7651E+002	+0.0000E+000
28	+1.8150E+002	+0.0000E+000
29	+1.8650E+002	+0.0000E+000

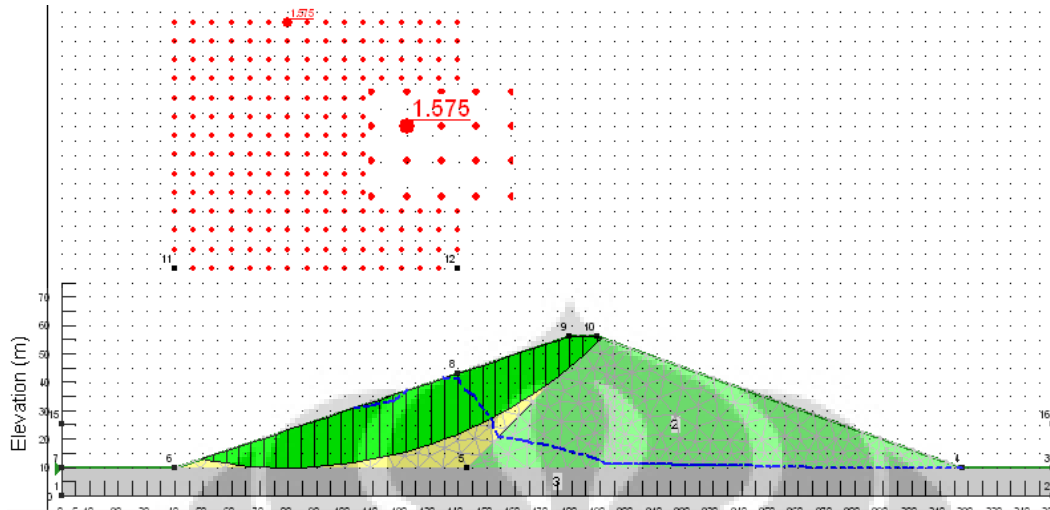
30

 $+1.9008E+002$ $+0.0000E+000$

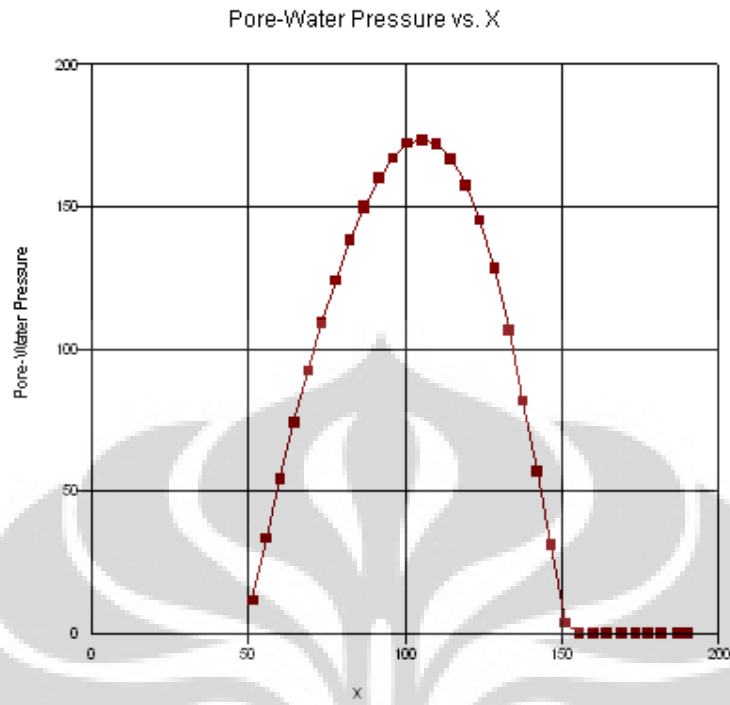
Pore-Water Pressure vs. X



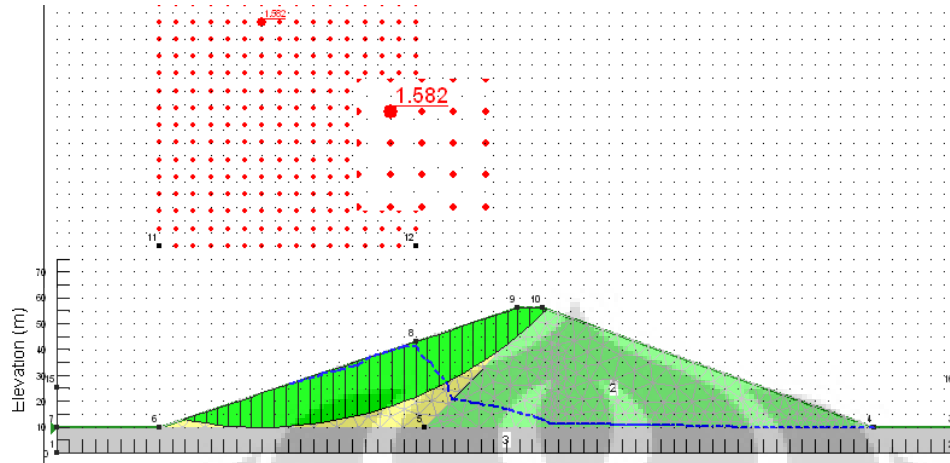
2. RAPID DRAWDOWN 1 HARI



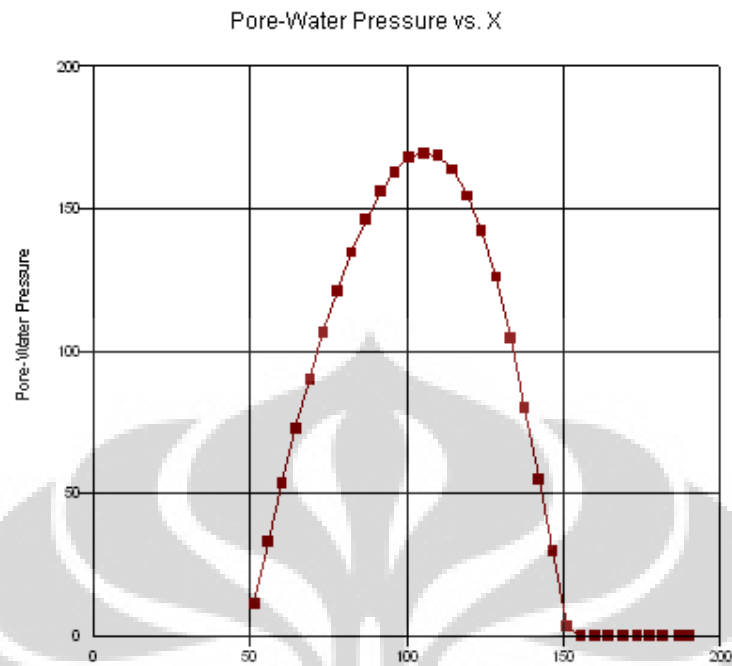
PT #	X-COORDINATE	P.W.P.
1	+5.1422E+001	+1.1414E+001
2	+5.5819E+001	+3.3534E+001
3	+6.0215E+001	+5.4446E+001
4	+6.4612E+001	+7.3984E+001
5	+6.9008E+001	+9.2147E+001
6	+7.3405E+001	+1.0901E+002
7	+7.7802E+001	+1.2409E+002
8	+8.2297E+001	+1.3809E+002
9	+8.6890E+001	+1.4991E+002
10	+9.1483E+001	+1.6017E+002
11	+9.6076E+001	+1.6713E+002
12	+1.0067E+002	+1.7225E+002
13	+1.0526E+002	+1.7341E+002
14	+1.0985E+002	+1.7220E+002
15	+1.1445E+002	+1.6698E+002
16	+1.1904E+002	+1.5758E+002
17	+1.2363E+002	+1.4509E+002
18	+1.2823E+002	+1.2846E+002
19	+1.3282E+002	+1.0659E+002
20	+1.3741E+002	+8.1889E+001
21	+1.4194E+002	+5.6607E+001
22	+1.4640E+002	+3.0978E+001
23	+1.5086E+002	+3.6045E+000
24	+1.5532E+002	+0.0000E+000
25	+1.5978E+002	+0.0000E+000
26	+1.6423E+002	+0.0000E+000
27	+1.6869E+002	+0.0000E+000
28	+1.7315E+002	+0.0000E+000
29	+1.7719E+002	+0.0000E+000
30	+1.8150E+002	+0.0000E+000
31	+1.8650E+002	+0.0000E+000
32	+1.8970E+002	+0.0000E+000



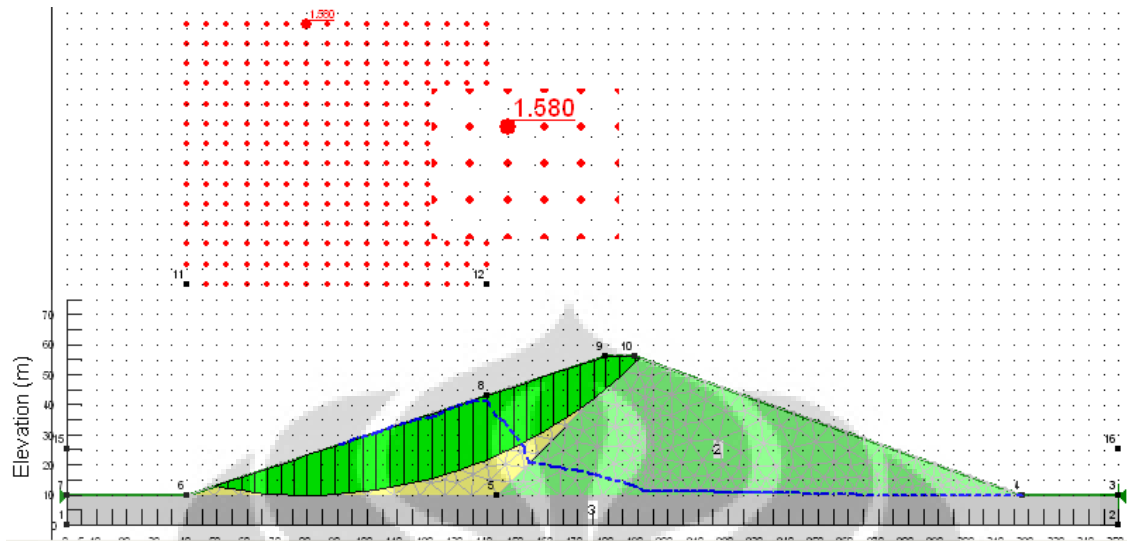
3. RAPID DRAWDOWN 3 HARI



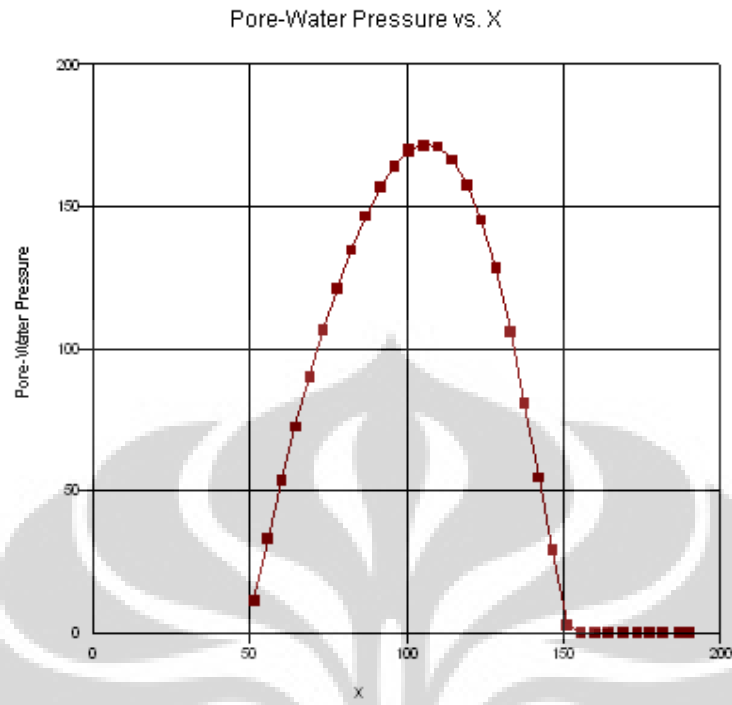
PT #	X-COORDINATE	P.W.P.
1	+5.1422E+001	+1.1319E+001
2	+5.5819E+001	+3.3035E+001
3	+6.0215E+001	+5.3456E+001
4	+6.4612E+001	+7.2549E+001
5	+6.9008E+001	+9.0212E+001
6	+7.3405E+001	+1.0656E+002
7	+7.7802E+001	+1.2117E+002
8	+8.2297E+001	+1.3471E+002
9	+8.6890E+001	+1.4618E+002
10	+9.1483E+001	+1.5611E+002
11	+9.6076E+001	+1.6297E+002
12	+1.0067E+002	+1.6807E+002
13	+1.0526E+002	+1.6944E+002
14	+1.0985E+002	+1.6860E+002
15	+1.1445E+002	+1.6373E+002
16	+1.1904E+002	+1.5470E+002
17	+1.2363E+002	+1.4256E+002
18	+1.2823E+002	+1.2622E+002
19	+1.3282E+002	+1.0462E+002
20	+1.3741E+002	+8.0167E+001
21	+1.4194E+002	+5.5004E+001
22	+1.4640E+002	+2.9730E+001
23	+1.5086E+002	+3.2569E+000
24	+1.5532E+002	+0.0000E+000
25	+1.5978E+002	+0.0000E+000
26	+1.6423E+002	+0.0000E+000
27	+1.6869E+002	+0.0000E+000
28	+1.7315E+002	+0.0000E+000
29	+1.7719E+002	+0.0000E+000
30	+1.8150E+002	+0.0000E+000
31	+1.8650E+002	+0.0000E+000
32	+1.8970E+002	+0.0000E+000



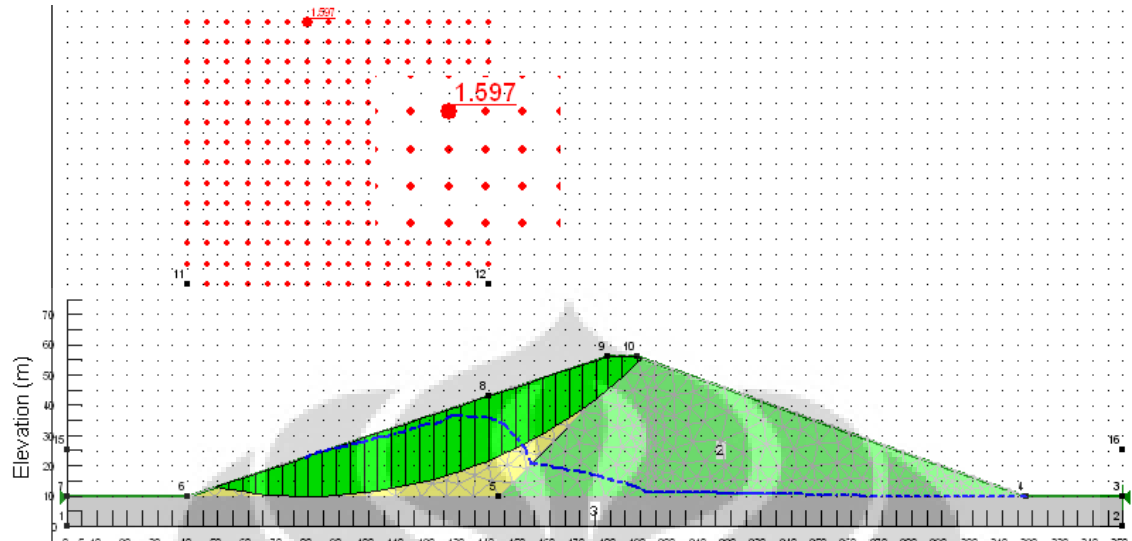
4. RAPID DRAWDOWN 7 HARI



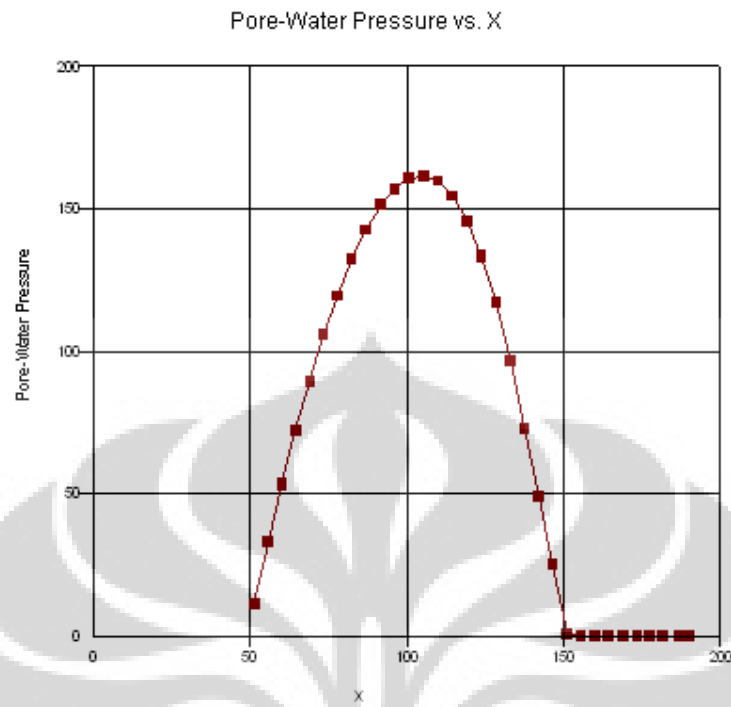
PT #	X-COORDINATE	P.W.P.
1	+5.1422E+001	+1.1301E+001
2	+5.5819E+001	+3.2952E+001
3	+6.0215E+001	+5.3309E+001
4	+6.4612E+001	+7.2368E+001
5	+6.9008E+001	+9.0030E+001
6	+7.3405E+001	+1.0640E+002
7	+7.7802E+001	+1.2113E+002
8	+8.2297E+001	+1.3481E+002
9	+8.6890E+001	+1.4659E+002
10	+9.1483E+001	+1.5686E+002
11	+9.6076E+001	+1.6418E+002
12	+1.0067E+002	+1.6975E+002
13	+1.0526E+002	+1.7155E+002
14	+1.0985E+002	+1.7111E+002
15	+1.1445E+002	+1.6645E+002
16	+1.1904E+002	+1.5737E+002
17	+1.2363E+002	+1.4502E+002
18	+1.2823E+002	+1.2817E+002
19	+1.3282E+002	+1.0583E+002
20	+1.3741E+002	+8.0595E+001
21	+1.4194E+002	+5.4609E+001
22	+1.4640E+002	+2.8841E+001
23	+1.5086E+002	+2.6199E+000
24	+1.5532E+002	+0.0000E+000
25	+1.5978E+002	+0.0000E+000
26	+1.6423E+002	+0.0000E+000
27	+1.6869E+002	+0.0000E+000
28	+1.7315E+002	+0.0000E+000
29	+1.7719E+002	+0.0000E+000
30	+1.8150E+002	+0.0000E+000
31	+1.8650E+002	+0.0000E+000
32	+1.8970E+002	+0.0000E+000



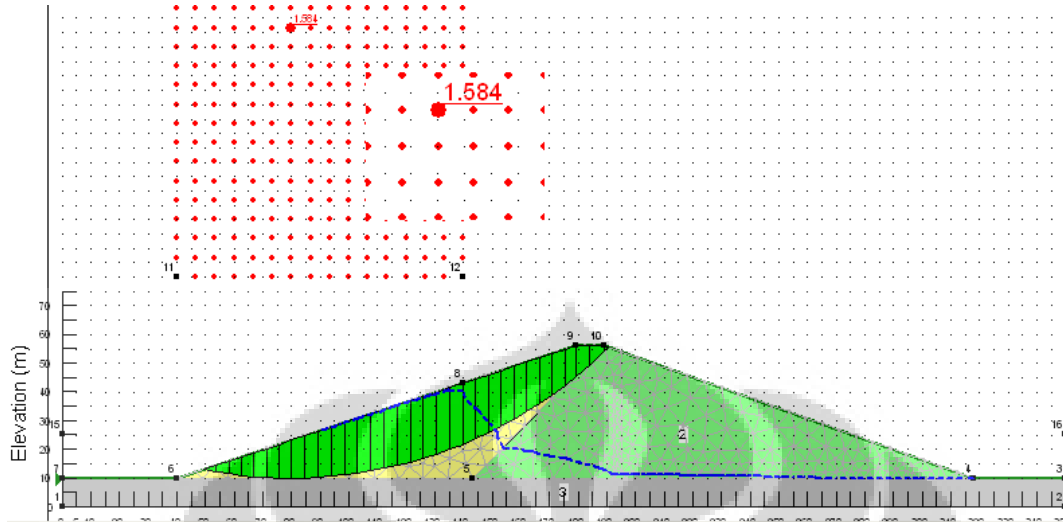
5. RAPID DRAWDOWN 15 HARI



PT #	X-COORDINATE	P.W.P.
1	+5.1422E+001	+1.1294E+001
2	+5.5819E+001	+3.2916E+001
3	+6.0215E+001	+5.3201E+001
4	+6.4612E+001	+7.2153E+001
5	+6.9008E+001	+8.9545E+001
6	+7.3405E+001	+1.0557E+002
7	+7.7802E+001	+1.1954E+002
8	+8.2297E+001	+1.3234E+002
9	+8.6890E+001	+1.4265E+002
10	+9.1483E+001	+1.5136E+002
11	+9.6076E+001	+1.5694E+002
12	+1.0067E+002	+1.6081E+002
13	+1.0526E+002	+1.6130E+002
14	+1.0985E+002	+1.5974E+002
15	+1.1445E+002	+1.5453E+002
16	+1.1904E+002	+1.4543E+002
17	+1.2363E+002	+1.3339E+002
18	+1.2823E+002	+1.1739E+002
19	+1.3282E+002	+9.6501E+001
20	+1.3741E+002	+7.2932E+001
21	+1.4194E+002	+4.8862E+001
22	+1.4640E+002	+2.5069E+001
23	+1.5086E+002	+9.5637E-001
24	+1.5532E+002	+0.0000E+000
25	+1.5978E+002	+0.0000E+000
26	+1.6423E+002	+0.0000E+000
27	+1.6869E+002	+0.0000E+000
28	+1.7315E+002	+0.0000E+000
29	+1.7719E+002	+0.0000E+000
30	+1.8150E+002	+0.0000E+000
31	+1.8650E+002	+0.0000E+000
32	+1.8970E+002	+0.0000E+000



6. RAPID DRAWDOWN 30 HARI



PT #	X-COORDINATE	P.W.P.
1	+5.1422E+001	+1.1293E+001
2	+5.5819E+001	+3.2921E+001
3	+6.0215E+001	+5.3248E+001
4	+6.4612E+001	+7.2291E+001
5	+6.9008E+001	+8.9930E+001
6	+7.3405E+001	+1.0627E+002
7	+7.7802E+001	+1.2094E+002
8	+8.2297E+001	+1.3456E+002
9	+8.6890E+001	+1.4619E+002
10	+9.1483E+001	+1.5631E+002
11	+9.6076E+001	+1.6339E+002
12	+1.0067E+002	+1.6871E+002
13	+1.0526E+002	+1.7020E+002
14	+1.0985E+002	+1.6945E+002
15	+1.1445E+002	+1.6445E+002
16	+1.1904E+002	+1.5504E+002
17	+1.2363E+002	+1.4235E+002
18	+1.2823E+002	+1.2518E+002
19	+1.3282E+002	+1.0260E+002
20	+1.3741E+002	+7.7173E+001
21	+1.4194E+002	+5.1027E+001
22	+1.4640E+002	+2.5215E+001
23	+1.5086E+002	+0.0000E+000
24	+1.5532E+002	+0.0000E+000
25	+1.5978E+002	+0.0000E+000
26	+1.6423E+002	+0.0000E+000
27	+1.6869E+002	+0.0000E+000
28	+1.7315E+002	+0.0000E+000
29	+1.7719E+002	+0.0000E+000
30	+1.8150E+002	+0.0000E+000
31	+1.8650E+002	+0.0000E+000
32	+1.8970E+002	+0.0000E+000

