

TUGAS AKHIR

ANALISIS REMBESAN DAN STABILITAS BENDUNGAN SARADAN (SEEPAGE ANALYSIS AND SLOPE STABILITY OF SARADAN DAM)

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



Muhammad Saidillah

15511158

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2021**

TUGAS AKHIR

ANALISIS REMBESAN DAN STABILITAS BENDUNGAN SARADAN (SEEPAGE ANALYSIS AND SLOPE STABILITY OF SARADAN DAM)

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil

Disusun oleh:

Muhammad Saidillah

15511158

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk
memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil
diuji pada tanggal 8 Februari 2022

Oleh Dewan Penguji

Pembimbing

Hanindya Kusuma Artati, S.T., M.T.
NIK: 045110407

Penguji I

Akhmad Marzuko, Ir., M.T.
NIK: 885110107

Penguji II

Edy Purwanto, Dr. Ir., CES., DEA.
NIK: 855110101

Mengesahkan
Ketua Program Studi Teknik Sipil



Dr. Ir. Sri Amini Yuni Astuti, M.T.
NIK: 885110101

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk penyelesaian program sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila dikemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.



KATA PENGANTAR

Assalamu 'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah puji syukur penyusun panjatkan kehadirat Allah SWT. Shalawat dan salam selalu terlimpahkan pada junjungan kita Nabi Muhammad SAW, keluarga serta para sahabat hingga akhir zaman. Atas rahmat dan hidayahnya penyusun dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul *Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Saradan*. Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Selama proses menyusun Tugas Akhir ini banyak hambatan yang dihadapi penyusun, namun berkat bimbingan, saran, kritik serta dorongan semangat dari berbagai pihak, *alhamdulillah* Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan hasil yang baik, maka dari itu pada kesempatan kali ini penyusun ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Hanindya Kusuma Artati, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir, yang telah memberikan banyak ilmu, pengarahan dan dukungan demi terselesaikannya penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Akhmad Marzuko, Ir.,M.T., selaku Dosen Penguji 1 Tugas Akhir yang telah memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyusunan dan penulisan Tugas Akhir ini.
3. Bapak EdyPurwanto,Dr. Ir.,CES., DEA., selaku Dosen Penguji 2 Tugas Akhir yang telah memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyusunan dan penulisan Tugas Akhir ini.
4. Ibu Dr. Ir. Sri Amini Yuni Astuti, M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
5. Keluarga yang telah mendukung dalam selama menjalani perkuliahan sampai dengan terselesaikannya Tugas Akhir ini.
6. Seluruh pihak yang telah mendukung terselesaikannya Tugas Akhir ini.

Akhirnya dengan selesainya Tugas Akhir ini, penyusun berharap agar dapat bermanfaat bagi berbagai pihak yang membacanya.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yogyakarta, 24 November 2021



Muhammad Saidillah

15511158



DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Halaman Pengesahan	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
DAFTAR NOTASI	xviii
ABSTRAK	xx
ABSTRACT	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Manfaat Penelitian	3
1.5. Batasan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Tinjauan Umum	5
2.2. Stabilitas Lereng	
Error! Bookmark not defined.	
2.2.1 Menganalisis Rembesana dan Stabilitas Bendungan dengan Metode Elemen Hingga Model 2D dan 3D	5
2.2.2 Melakukan Evaluasi pada Keamanan Tubuh Bendungan	6
2.2.3 Menganalisis Stabilitas dan Rembesan Tubuh Bendungan dengan Metode Fellenius dan GeoStudio	7

2.2.4	Menganalisis Geoteknik Bendungan Terhadap Keamanan Rembesan, Stabilitas Lereng dan Beban Gempa	7
2.2.5	Menganalisis Stabilitas dan Rembesan pada Bendungan dengan Metode Bishop dan Laplace	8
2.3.	Perbedaan dengan Penelitian yang Telah Ada	10
2.4.	Keaslian Penelitian	10
BAB III LANDASAN TEORI		18
3.1.	Tanah	18
3.1.1	Umum	18
3.1.2	Pengertian Tanah Lempung	18
3.2.	Klasifikasi Tanah	19
3.2.1	Sistem klasifikasi USCS	19
3.2.2	Sistem klasifikasi AASHTO	21
3.3.	Bendungan	22
3.3.1	Umum	22
3.3.2	Bendungan Urugan	22
3.3.3	Klasifikasi Bendungan Urugan	23
3.4.	Rembesan	25
3.4.1	Umum	25
3.4.2	Persamaan Darcy	25
3.4.3	Garis Freatik	26
3.4.4	Metode Cassagrande	27
3.4.5	Keamanan Rembesan Bendungan	28
3.5.	Stabilitas	30
3.5.1	Stabilitas Tubuh Bendungan.	30
3.5.2	Metode Bishop	30
3.5.1	Kriteria Nilai Faktor Keamanan Stabilitas Lereng Bendungan	31
3.6.	Beban Gempa	33
3.6.1	Umum	33
3.6.2	Jenis Gempa	33

3.6.3	Pengaruh Tingkat Risiko Bangunan	33
3.6.4	Koefisien Gempa	35
3.7.	Parameter Tanah	41
3.7.1	Koefisien Permeabilitas	41
3.7.2	Kuat Geser Tanah	41
3.7.3	Sudut Geser Tanah	42
3.8.	Geostudio	43
3.8.1	Umum	43
3.8.2	Program SLOPE/W	43
3.8.3	Program SEEP/W	44
BAB IV	METODE PENELITIAN	45
4.1	Tinjauan Umum	45
4.2	Lokasi Penelitian	45
4.3	Data Penelitian	46
4.4	Metode Penelitian	
	533	
4.5	Bagan Alir Penelitian	
	534	
BAB V	ANALISIS DAN PERHITUNGAN	577
5.1	Analisis Tingkat Resiko Bendungan	
	577	
5.2	Menghitung Koefisien Gempa	
	588	
5.3	Perhitungan Manual Rembesan Bendungan Dengan Metode Casagrande	
	599	
5.3.1	Rembesan pada Muka Air Banjir	
		59
	9	
5.3.2	Rembesan pada Muka Air Normal	
		61

5.3.3	Rembesan pada Muka Air Minimum	63
	3	
5.4	Perhitungan Stabilitas Dengan Garis Freatik Manual	644
5.4.1	Stabilitas Pada Kondisi Muka Air Banjir dengan Garis Freatik Manual	65
	5	
5.4.2	Stabilitas Pada Kondisi Muka Air Normal dengan Garis Freatik Manual	68
	8	
5.4.3	Stabilitas Pada Kondisi Muka Air Minimum dengan Garis Freatik Manual	72
	2	
5.4.4	Stabilitas Pada Kondisi Surut Cepat (<i>Rapid Drawdown</i>) dengan Garis Freatik Manual	76
	6	
5.5	Perhitungan Rembesan dengan SEEP/W	80
5.5.1	Debit Rembesan	80
5.6	Perhitungan Stabilitas Dengan Garis Freatik Hasil SEEP/W	82
5.6.1	Stabilitas Lereng Pada Kondisi Muka Air Banjir dengan Garis Freatik Hasil SEEP/W	82
5.6.2	Stabilitas Lereng Pada Kondisi Muka Air Normal dengan Garis Freatik Hasil SEEP/W	86
	6	
5.6.3	Stabilitas Lereng Pada Kondisi Muka Air Minimum dengan Garis Freatik Hasil SEEP/W	

	89
9	
5.6.4 Stabilitas Lereng Pada Kondisi Surut Cepat (Rapid Drawdown) dengan Garis Freatik Hasil SEEP/W	92
5.7 Pembahasan	966
5.8.1 Pembahasan Rembesan	96
6	
5.8.2 Pembahasan Stabilitas	98
8	
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	100
6.1. Kesimpulan	100
6.2. Saran	
1032	
DAFTAR PUSTAKA	1054
LAMPIRAN	1076

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu	10
Tabel 3. 1 Sistem Klasifikasi USCS	20
Tabel 3. 2 Tanah Granuler dalam Sistem Klasifikasi AASHTO	21
Tabel 3. 3 Tanah Berbutir Halus dalam Sistem Klasifikasi AASHTO	22
Tabel 3. 4 Kriteria Faktor Keamanan Minimum untuk Stabilitas Bendungan Tipe Urugan	32
Tabel 3. 5 Kriteria Faktor Risiko Untuk Evaluasi Keamanan Bendungan	34
Tabel 3. 6 Kelas Risiko Bendungan dan Bangunan Air	35
Tabel 3. 7 Faktor Amplikasi (FPGA)	39
Tabel 3. 8 Penentuan Prosedur Analisis	40
Tabel 3. 9 Besaran Sudut Geser Dalam Tanah	42
Tabel 4. 1 Data Teknis Bendungan Saradan	46
Tabel 4. 2 Data Tanah pada Bendungan Saradan	51
Tabel 5. 1 Tingkat Risiko Bendungan Saradan	57
Tabel 5. 2 Rekapitulasi Hasil Debit Rembesan	964
Tabel 5. 3 Hasil Evaluasi Keamanan Bendungan Saradan Berdasarkan Debit Rembesan	975
Tabel 5. 4 Rekapitulasi Hasil Gradien Hidrolik	975
Tabel 5. 5 Hasil Evaluasi Keamanan Bendungan Pondok Berdasarkan Gradien Hidrolik Rembesan	986
Tabel 5. 6 Rekapitulasi Stabilitas Lereng dengan Garis Freatik Manual	987
Tabel 5. 7 Rekapitulasi Stabilitas Lereng dengan Garis Freatik Hasil SEEP/W	998

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Potongan Melintang Bendungan Urugan Homogen	24
Gambar 3. 2 Potongan Melintang Bendungan Urugan Zonal	24
Gambar 3. 3 Potongan Melintang Bendungan Urugan Bersekat	25
Gambar 3. 4 Potongan Melintang Garis Freatik Pada Bendungan Urugan	27
Gambar 3. 5 Hitungan Rembesan Cara Casagrande	27
Gambar 3. 6 Sistem Gaya Pada Suatu Elemen Menurut Bishop	31
Gambar 3. 7 Peta Percepatan Puncak Batuan dDsar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 20% dalam 10 tahun	36
Gambar 3. 8 Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 10% dalam 10 tahun	36
Gambar 3. 9 Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 10% dalam 50 tahun	37
Gambar 3. 10 Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 7% dalam 75 tahun	37
Gambar 3. 11 Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 2% dalam 50 tahun	38
Gambar 3. 12 Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 2% dalam 100 tahun	38
Gambar 4. 1 Lokasi Waduk Saradan	46
Gambar 4. 2 Peta Situasi Bendungan Saradan	49
Gambar 4. 3 Potongan Melintang Sta.10 Bendungan Saradan	49
Gambar 4. 4 Titik Uji Pemboran Bendungan Saradan	50
Gambar 4. 5 Bagan Alir Permodelan GeoStudio	50
Gambar 4. 6 Bagan Alir Penelitian	50
Gambar 5. 1 Hitungan Rembesan Metode Casagrande pada Kondisi Muka Air Banjir	59

Gambar 5. 2 Hitungan Rembesan Metode Casagrande pada Kondisi Muka Air Normal	61
Gambar 5. 3 Hitungan Rembesan Metode Casagrande pada Kondisi Muka Air Minimum	63
Gambar 5. 4 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir	65
Gambar 5. 5 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir	66
Gambar 5. 6 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir	66
Gambar 5. 7 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir	67
Gambar 5. 8 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir	67
Gambar 5. 9 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir	68
Gambar 5. 10 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal	69
Gambar 5. 11 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal	69
Gambar 5. 12 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal	70
Gambar 5. 13 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal	71
Gambar 5. 14 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal	71

Gambar 5. 15 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal	72
Gambar 5. 16 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum	73
Gambar 5. 17 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum	73
Gambar 5. 18 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum	74
Gambar 5. 19 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum	74
Gambar 5. 20 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum	75
Gambar 5. 21 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum	75
Gambar 5. 22 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat	76
Gambar 5. 23 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat	77
Gambar 5. 24 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat	77
Gambar 5. 25 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum	78
Gambar 5. 26 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat	78

Gambar 5. 27 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat	79
Gambar 5. 28 Hasil Perhitungan Rembesan Dengan SEEP/W Dengan Kondisi Muka Air Banjir	80
Gambar 5. 29 Hasil Perhitungan Rembesan Dengan SEEP/W Dengan Kondisi Muka Air Normal	81
Gambar 5. 30 Hasil Perhitungan Rembesan Dengan SEEP/W Dengan Kondisi Muka Air Minimum	82
Gambar 5. 31 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Tanpa Gempa dengan SEEP/W pada Kondisi Muka Air Banjir	83
Gambar 5. 32 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir	83
Gambar 5. 33 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir	84
Gambar 5. 34 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir	84
Gambar 5. 35 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir	85
Gambar 5. 36 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir	85
Gambar 5. 37 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal	86
Gambar 5. 38 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal	86

Gambar 5. 39 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal	87
Gambar 5. 40 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal	87
Gambar 5. 41 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal	88
Gambar 5. 42 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal	88
Gambar 5. 43 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum	89
Gambar 5. 44 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum	90
Gambar 5. 45 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum	90
Gambar 5. 46 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum	91
Gambar 5. 47 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum	91
Gambar 5. 48 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum	92
Gambar 5. 49 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Surut Cepat	93
Gambar 5. 50 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat	93

Gambar 5. 51 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat	94
Gambar 5. 52 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat	94
Gambar 5. 53 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat	95
Gambar 5. 54 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat	95



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Teknis Bendungan Saradan	108
Lampiran 2 Hasil Laboratorium	110
Lampiran 3 Bor Log	1111
Lampiran 4 Peta Situasi Bendungan Saradan	1133
Lampiran 5 Potongan Melintang Bendungan Saradan Sta.10	1144



DAFTAR NOTASI

Notasi :

c	= Kohesi (kN/m)
ϕ	= Sudut Geser Dalam ($^{\circ}$)
γ_d	= Berat Volume Tanah Kering (gr/cm ³)
γ	= Berat Volume Tanah Basah (gr/cm ³)
w	= Kadar Air (%)
G_s	= Berat Jenis
C_c	= Indeks Kompresi
C_v	= Konsolidasi (cm ² /det)
n	= Jumlah Pukulan
k	= koefisien permeabilitas (m/dt)
q	= debit rembesan (m ³ /det)
α	= sudut hilir tanggul ($^{\circ}$)
a	= panjang zona basah (m)
H	= tinggi muka air (m)
i_c	= Gradien hidrolik dari material
i_e	= Gradien hidrolik debit
e	= Angka pori

Singkatan :

AASHTO	= <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
USCS	= <i>Unified Soil Classification System</i>
USBR	= <i>United State Bureau of Reclamation</i>
OBE	= <i>Operating Basis Earthquake</i>

MDE	= <i>Maximum Design Earthquake</i>
SF	= <i>Safety Factor</i>
SNI	= Standar Nasional Indonesia
FR	= Faktor Risiko
FRk	= Faktor risiko kapasitas tampung
FRt	= Faktor risiko tinggi bendungan
FRe	= Faktor risiko kebutuhan evakuasi
FRh	= Faktor risiko tingkat kerusakan
PGA	= <i>Peak Ground Acceleration</i>



ABSTRAK

Bendungan Saradan adalah salah satu bendungan yang terletak di kecamatan Saradan, Kabupaten Madiun, Provinsi Jawa Timur. Bendungan Saradan dibangun antara tahun 1942 oleh Pemerintah Hindia Belanda, karena itu untuk mengetahui keamanan bendungan perlu dilakukan peninjauan terhadap rembesan dan stabilitas tubuh bendungan saat ini.

Pada penelitian ini menggunakan metode Casagrande untuk menganalisis rembesan yang terjadi pada tubuh bendungan dan metode Bishop untuk menganalisis stabilitas tubuh bendungan dengan menambahkan factor koefisien beban gempa OBE (*Operating Basis Earthquake*) dan MDE (*Maximum Design Earthquake*). Penelitian ini menggunakan bantuan program Geostudio 2012 untuk analisis rembesan dan stabilitas tubuh bendungan pada kondisi muka air banjir, muka air normal, muka air minimum, dan surut cepat (*Rapid Drawdown*).

Hasil analisis dengan GeoStudio 2012 menunjukkan bahwa angka keamanan stabilitas tubuh bendungan Saradan pada kondisi muka air banjir tanpa gempa $6,005 > 1,5$ (Aman), dengan gempa OBE $3,452 > 1,5$ (Aman), dengan gempa MDE $1,457 > 1$ (Aman), selanjutnya pada kondisi muka air normal tanpa gempa $5,037 > 1,5$ (Aman), dengan gempa OBE $3,124 > 1,2$ (Aman), dengan gempa MDE $1,407 > 1$ (Aman), selanjutnya pada kondisi muka air minimum tanpa gempa $2,541 > 1,5$ (Aman), dengan gempa OBE $2,031 > 1,2$ (Aman), dengan gempa MDE $1,245 > 1$ (Aman), selanjutnya pada kondisi surut cepat tanpa gempa $1,899 > 1,3$ (Aman), dengan gempa OBE $1,541 > 1,1$ (Aman), dengan gempa MDE $0,973 > 1$ (Tidak aman). Analisis rembesan pada bendungan saradan setelah dilakukan perhitungan manual dan hasil analisis program GeoStudio 2012 menunjukkan bahwa pada setiap kondisi dinyatakan aman.

Kata kunci: Stabilitas, Rembesan, Geostudio 2012.

ABSTRACT

Saradan Dam is one of the dams located in the Saradan sub-district, Madiun Regency, East Java Province. The Saradan Dam was built between 1942 by the Dutch East Indies Government, therefore to determine the safety of the dam it is necessary to review the seepage and stability of the current dam body.

This study uses the Casagrande method to analyze seepage that occurs in the dam body and the Bishop method to analyze the stability of the dam body by adding the earthquake load coefficient factor OBE (Operating Basis Earthquake) and MDE (Maximum Design Earthquake). This research uses the help of the GeoStudio 2012 program for analysis of seepage and stability of the dam body under conditions of flood water level, normal water level, minimum water level, and rapid drawdown.

The results of the analysis using Geostudio 2012 show that the safety factor for the stability of the Saradan dam body is in flood water level conditions without an earthquake 6,005 > 1,5 (Safe), with an OBE earthquake 3,452 > 1,5 (Safe), with an MDE earthquake 1,457 > 1 (Safe), then under normal water level conditions without an earthquake 5,037 > 1,5 (Safe), with an OBE earthquake 3,124 > 1,2 (Safe), with an MDE earthquake 1,407 > 1 (Safe), then at minimum water level conditions without an earthquake 2,541 > 1,5 (Safe), with an OBE earthquake 2,031 > 1,2 (Safe), with an MDE earthquake 1,245 > 1 (Safe), then at rapid drawdown conditions without an earthquake 1,899 > 1,3 (Safe), with an OBE earthquake 1,541 > 1,1 (Safe), with an MDE earthquake 0,973 > 1 (Safe). Seepage analysis on the Saradan dam after manual calculations and the results of the 2012 GeoStudio program analysis showed that in every condition it was safe.

Keyword : *Stability, Seepage, Geostudio 2012.*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Negara Indonesia merupakan suatu negara yang memiliki potensi sumber daya air yang besar untuk dapat dikembangkan dan dimanfaatkan. Pemanfaatan sumber daya air di Indonesia salah satunya ialah dibangunnya bangunan air berupa bendungan dan waduk.

Bendungan merupakan salah satu bangunan air yang dibangun dengan tujuan untuk menahan, menangkap laju air kemudian menyimpannya sehingga menjadi waduk atau danau. Bendungan pada umumnya berupa urugan batu, urugan tanah, beton, dan pasangan batu. Waduk atau *reservoir* merupakan bangunan tampungan berupa danau buatan atau danau alam dan pembendungan sungai dengan tujuan menampung air sungai untuk memenuhi kebutuhan hidup manusia dan di beberapa daerah bendungan juga difungsikan untuk mengalirkan air dari waduk ke sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Air, akan tetapi pembangunan sebuah bendungan juga dapat berpotensi menimbulkan bahaya besar, maka dari itu pada saat dilakukannya pembangunan sebuah bendungan perlu diperhatikan dengan baik dari segi keamanan struktur bendungan dan kondisi geologinya.

Waduk dan bendungan yang ada di Indonesia salah satunya adalah waduk dan bendungan Saradan yang berada di Desa Pajaran, Kecamatan Saradan, Kabupaten Madiun, Provinsi Jawa Timur. Bendungan Saradan merupakan tipe bendungan urugan tanah homogen dan pada tubuh bendungan Saradan material penyusunnya berupa lanau dan campuran *clay & sand*, dengan tinggi maksimum +9 m, panjang puncak 730 m, dan lebar puncak 3-6 m. Waduk Saradan dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan air irigasi seluas 990 Ha yang meliputi 8 desa yang berada di Kecamatan Saradan yaitu Desa Sidorejo, Desa Bongso Potro, Desa Sambirejo, Desa Tulung, Desa Klumutan, Desa Mbener, Desa Sidorejo, dan

Desa Bajulan. Adapun pemanfaatan dari Waduk Saradan adalah sebagai pariwisata masyarakat.

Aspek geomorfologi menunjukkan bahwa lokasi bendungan Saradan merupakan daerah cekungan dengan kemiringan lahan cukup landai, dengan kemiringan lereng berkisar antara 5% - 10% , secara geologis daerah tersebut merupakan daerah yang tertutupi oleh material *alluvial* yang terdiri dari material lempung dan lanau.

Bendungan yang dibangun dengan tipe urugan akan sangat riskan terhadap keruntuhan (*collapse*) yang diakibatkan karena beban gempa yang diterima atau geometrik dari bangunan bendungan itu sendiri (Nanda dan Hamdhan, 2016). Sundary dan Azmeri (2013) menyatakan bahwa keamanan suatu bangunan bendungan terhadap kelongsoran lereng dan rembesan (*seepage*) adalah persyaratan utama untuk kestabilan suatu bangunan bendungan, pada dasarnya setiap bendungan akan mengalami rembesan, namun rembesan yang terjadi tidak boleh melewati batas rembesan yang diizinkan, bila rembesan yang terjadi melebihi batas, maka akan terjadi lepasnya ikatan antar partikel tanah dan membentuk deformasi pada tubuh bendungan yang dikhawatirkan dapat terjadi keruntuhan bendungan yang dapat menimbulkan kerugian.

Bendungan Saradan memerlukan adanya penelitian mengenai stabilitas dan rembesan terhadap Bendungan Saradan untuk mengetahui kelayakan dan keamanan pada bendungan Saradan yang ditinjau dari kestabilan bendungan dan rembesan yang terjadi. Hasil analisis akan memperlihatkan angka faktor keamanan dan rembesan yang terjadi pada bendungan Saradan, dengan data yang ada dilapangan dan hasil dari laboratorium. Penelitian ini dilakukan sebagai penelitian tugas akhir penulis, dengan mengangkat judul : “Analisis Rembesan dan Stabilitas pada Bendungan Saradan”.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana nilai tingkat klasifikasi resiko bendungan ?
2. Bagaimana rembesan dan stabilitas pada bangunan bendungan Saradan pada kondisi muka air banjir berdasarkan analisis menggunakan program GeoStudio 2012 ?
3. Bagaimana rembesan dan stabilitas pada bangunan bendungan Saradan pada kondisi muka air normal berdasarkan analisis menggunakan program GeoStudio 2012 ?
4. Bagaimana rembesan dan stabilitas pada bangunan bendungan Saradan pada kondisi muka air minimum berdasarkan analisis menggunakan program GeoStudio 2012 ?
5. Bagaimana stabilitas pada bangunan bendungan Saradan pada kondisi surut cepat berdasarkan analisis menggunakan program GeoStudio 2012 ?

1.3. Tujuan Penelitian

1. Mengetahui nilai tingkat klasifikasi resiko bendungan
2. Mengetahui rembesan dan stabilitas pada bangunan bendungan Saradan pada kondisi muka air banjir berdasarkan analisis menggunakan program GeoStudio 2012
3. Mengetahui rembesan dan stabilitas pada bangunan bendungan Saradan pada kondisi muka air normal berdasarkan analisis menggunakan program GeoStudio 2012
4. Mengetahui rembesan dan stabilitas pada bangunan bendungan Saradan pada kondisi muka air minimum berdasarkan analisis menggunakan program GeoStudio 2012
5. Mengetahui stabilitas pada bangunan bendungan Saradan pada kondisi surut cepat berdasarkan analisis menggunakan program GeoStudio 2012

1.4. Manfaat Penelitian

Dapat mengetahui angka keamanan dari bendungan Saradan dari rembesan dan stabilitas bendungan terhadap beban gempa statik sesuai dengan SNI

8064:2012 untuk stabilitasnya dan nilai angka rembesan berdasarkan *Japanese Institute of Imigration and Drainage 1998*, sehingga menambah wawasan dalam bidang geoteknika terutama pada bangunan bendungan.

1.5. Batasan Penelitian

1. Bangunan Bendungan yang ditinjau yaitu Bendungan Saradan, Desa Sugihwaras, Kecamatan Saradan, Kabupaten Madiun, Provinsi Jawa Timur
2. Data yang digunakan pada penelitian kali ini menggunakan data sekunder, sehingga tidak ada turun ke lapangan.
3. Analisis stabilitas dilakukan bendungan dengan program *SLOPE/W* dengan metode Bishop
4. Analisis rembesan dilakukan dengan program *SEEP/W* dan metode Casagrande
5. Garis freatik rembesan tidak berdasarkan piezometer di lapangan.
6. Penelitian ini hanya sebatas menganalisis stabilitas dan rembesannya, tidak termasuk metode pelaksanaan dan perhitungan Rencana Anggaran Biaya. Beban pada puncak bendungan diabaikan.
7. Potongan yang digunakan yaitu potongan Sta.10.
8. Beban gempa yang digunakan adalah gempa statik dengan menggunakan peta gempa 2017.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Pada BAB 1 sebelumnya telah dibahas mengenai latar belakang, tujuan penelitian, manfaat penelitian serta batasan masalah dari tugas akhir yang akan dilakukan. Pada BAB ini akan dilanjutkan dengan pemaparan berupa hasil penelitian yang serupa dengan penelitian ini dengan tujuan sebagai referensi penelitian dan juga agar terhindar dari plagiasi penelitian.

2.2 Stabilitas Lereng

Dalam tinjauan pustaka ini penulis menyertakan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya yang relevan dengan penelitian yang akan dilakukan penulis yang bisa digunakan sebagai bahan referensi serta bahan perbandingan penelitian yang dilakukan.

2.2.1 Menganalisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan dengan Metode

Elemen Hingga Model 2D dan 3D

Nanda dan Hamdhan (2016), melakukan penelitian mengenai analisis rembesan dan stabilitas bendungan Bajulmati yang berlokasi di perbatasan antar Kabupaten Banyuwangi dan Kabupaten Situbondo, Provinsi Jawa Timur. Analisis rembesan dan stabilitas pada penelitian ini akan di analisis dengan menggunakan metode elemen hingga dengan model 2D dan 3D, analisis rembesan dan stabilitas yang menggunakan program *PLAXIS AE* akan menghasilkan faktor keamanan, debit rembesan dan arah bidang runtuh. Hasil faktor keamanan akan di bandingkan dengan syarat minimum faktor keamanan dari RSNI-M-03-2002, sehingga dapat diketahui bendungan aman atau tidak. Hasil penelitian ini pada kondisi pembebanan *after construction*, muka air minimum, muka air maksimum dan surut cepat pada model 2D sebelum diberi beban gempa diperoleh nilai *safety factor* berturut-turut sebesar 2,088; 1,876; 1,965; 1,750 dan 1,823; 1,688; 1,461;

1,452 untuk hasil analisis setelah diberi beban gempa. Arah bidang runtuh pada model 2D sebelum terjadi gempa berturut-turut bergerak ke arah hilir, hulu, hilir dan hulu. Sedangkan, untuk kondisi setelah terjadi gempa arah bidang runtuh keseluruhannya bergerak ke arah hilir. Hasil faktor keamanan pada model 3D berturut-turut adalah sebesar 2,321; 1,951; 2,103; 1,890 dan arah bidang longsor ke arah hulu, hulu, hilir dan hulu. Nilai faktor keamanan yang diperoleh dari model 2D dan 3D keseluruhannya memenuhi syarat keamanan berdasarkan RSNI-M-03-2002 dengan nilai syarat SF sebesar 1,1 s/d 1,5 (Badan Standarisasi Nasional, 2002).

2.2.2 Melakukan Evaluasi Pada Keamanan Tubuh Bendungan

Dipa (2017), penelitian ini dilakukan pada bendungan Saradan karena masa aktif bendungan yang sudah tua, maka perlu dilakukan evaluasi terhadap keamanan tubuh bendungan tersebut. Evaluasi keamanan tubuh Bendungan Saradan dilakukan pada 2 stasiun yaitu stasiun 03+50 dan stasiun 06+00 meliputi analisis rembesan Casagrande dan analisis *pseudostatik* dengan koefisien gempa termodifikasi sebagai beban gempa. Hasil dari dua analisis ini akan digunakan untuk melakukan analisis stabilitas bendungan dengan menggunakan *Plaxis 8.2* model 2D dengan tanpa gempa dan akibat beban gempa berdasarkan kondisi muka air waduk kosong, normal, penuh dan surut cepat. Bendungan Saradan dari dua stasiun bendungan yang di tinjau, kondisi tanpa gempa, hasil *Plaxis* menunjukkan pada stasiun 03+50 dinyatakan tidak aman ($SF_{izin} = 1,5$) dengan $SF = 1,344$ untuk kondisi muka air waduk kosong, $SF = 1,318$ akibat muka air waduk surut tiba-tiba dari muka air penuh, $SF = 1,323$ berdasarkan kondisi muka air waduk surut tiba-tiba dari muka air normal. Akibat gempa periode (T) = 100 th dinyatakan tidak aman ($SF_{izin} = 1,2$) dengan $SF = 1,029$ untuk kondisi muka air waduk kosong, $SF = 0,967$ akibat muka air waduk surut tiba-tiba dari muka air penuh, $SF = 0,994$ berdasarkan kondisi muka air waduk surut tiba-tiba dari muka air normal. Akibat gempa periode (T) = 3000 th dinyatakan tidak aman ($SF_{izin} = 1,0$) dengan $SF = 0,786$ akibat muka air waduk surut tiba-tiba dari muka air

penuh, $SF = 0,809$ berdasarkan kondisi muka air waduk surut tiba-tiba dari muka air normal.

2.2.3 Menganalisis Stabilitas dan Rembesan Tubuh Bendungan dengan Metode Fellenius dan *Geostudio*

Sholeh, Suhartono, dan Choirini (2019), Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis stabilitas tubuh bendungan pada proyek Waduk Bendo Ponorogo. Pada penelitian ini data yang dibutuhkan yaitu data geologi pondasi bendungan, gambar potongan tubuh bendungan, dan data material tanggul. Dalam penelitian ini untuk metode perbaikan pondasi digunakan 3 metode yaitu : *curtain grouting*, *consolidated grouting*, dan *blanket grouting*. Sedangkan untuk perhitungan rembesan menggunakan metode casagrande, untuk angka keamanan bendungan digunakan metode fellenius yang dibantu dengan program *Geostudio* 2012. Penelitian ini juga akan memperhitungkan Rencana Anggaran Biaya untuk tubuh bendungan dari Proyek Waduk Bendo Ponorogo. Hasil penelitian ini dengan 3 metode : *curtain grouting* dengan kedalaman 39,83 m, *consolidated grouting* dengan kedalaman 5 m, dan *blanket grouting* dengan kedalaman 15 m. Debit rembesan $< 1\%$ dari batas debit rembesan yang berarti aman, Kecepatan rembesan sebesar $7,3816 \times 10^{-7}$ m/detik $<$ kecepatan kritis rembesan sebesar 0,004017 m/detik dan $11,97 > 4$ yang berarti aman terhadap piping. Angka stabilitas lereng sebesar $3,331 > 1,5$ pada berbagai kondisi yang berarti aman, dan hasil analisa perhitungan RAB membutuhkan biaya sebesar Rp 290.288.884.070,62.

2.2.4 Menganalisis Geoteknik Bendungan Terhadap Keamanan Rembesan, Stabilitas Lereng, dan Beban Gempa

Imron, Sarah, dan Hardiyati (2017), Penelitian ini dilakukan di Bendungan Gongseng yang terletak di Bojonegoro, Jawa Timur. Bendungan ini direncanakan untuk kebutuhan irigasi seluas 6,169 Ha dan air baku 300 liter/detik. Mengingat pentingnya peran waduk tersebut, maka penulis melakukan studi analisa keamanan bendungan terhadap rembesan, stabilitas lereng, dan beban gempa. Hasil analisa penerimaan material menunjukkan bahwa sampel lempung, pasir, dan

batuan layak digunakan sebagai bahan timbunan. Justifikasi tersebut didasarkan pada hasil pengujian di Laboratorium Mekanika Tanah Undip dan data dari pihak konsultan perencana. Pengujian tersebut meliputi: proctor, *maximum-minimum density*, *triaxial UU*, *direct shear*, *constant head*, *falling head*, gradasi, dan *soil properties*. Berikutnya dilakukan pemodelan dengan menggunakan *Plaxis 8.2* dan *Geostudio 2007* menunjukkan keamanan baik pada stabilitas lereng terhadap beban normal, dan stabilitas terhadap beban gempa. Hasil Penelian ini didapatkan Dengan *plaxis 8.2* dan *seep/w (geostudio)*, telah dilakukan analisa keamanan bendungan terhadap bahaya rembesan, meliputi: debit rembesan, pengamatan garis freatik, dan bahaya *boilling*, menunjukkan hasil yang beragam. Bendungan dinyatakan aman pada analisa garis freatik dan tidak aman pada analisa debit rembesan dan bahaya *boiling*, bendungan tidak aman terhadap bahaya rembesan sehingga perlu dilakukan perbaikan berupa injeksi semen (*grouting*) pada batuan pondasi sepanjang as bendungan. Dengan *plaxis 8.2* dan *slope/w (geostudio)*, telah dilakukan analisa stabilitas lereng bendungan terhadap beban normal pada tiga kondisi yaitu: *steady state*, *afterconstruction*, dan *rapid draw down* yang menunjukkan hasil bahwa bendungan dinyatakan aman pada ketiga kondisi tersebut. Dengan *plaxis 8.2*, telah dilakukan analisa stabilitas lereng terhadap beban gempa, dengan metode perhitungan koefisien gempa secara *OBE* periode ulang 100 tahun, menunjukkan hasil bahwa bendungan aman.

2.2.5 Menganalisis Stabilitas dan Rembesan pada Bendungan dengan

Metode Bishop dan Laplace

Htwe & Naing (2017), Penelitian ini meneliti mengenai analisis rembesan dan stabilitas lereng bendungan Myttha yang berada di Myanmar. Maksud dan tujuan penelitian ini adalah menganalisis rembesan dan stabilitas bendungan berdasarkan tiga kondisi yaitu : setelah konstruksi tanpa diisi air pada waduk, rembesan pada muka air normal, dan rapid drawdown pada waduk. Analisis rembesan dan stabilitas dilakukan dengan dua cara yaitu dengan cara analisis manual dan analisis menggunakan program komputer. Untuk analisis manual, perhitungan rembesan dan stabilitas menggunakan rumus Laplace berdasarkan

hukum Darcy serta metode potongan dan metode Bishop. Sedangkan untuk analisis menggunakan program komputer, penelitian ini menggunakan program komputer *SLOPE/W* dan *SEEP/W*. Hasil penelitian ini didapatkan bahwa bendungan aman terhadap rembesan dan stabilitas lereng bendungan pada setiap kondisi yang diteliti.



2.3 Perbedaan dengan Penelitian yang Telah Ada

Perbedaan penelitian ini dengan penelitian yang telah ada sebelumnya dapat dilihat pada Tabel 2.1 sebagai berikut.

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Peneliti	Nanda & Hamdhan (2016)	Dipa. (2017)	Sholeh. (2019)	Imron, dkk. (2017)	Htwe & Naing (2017)	Saidillah. (2020)
Judul	Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Bajulmati dengan Metode Elemen Hingga Model 2D dan 3D.	Evaluasi Keamanan Tubuh Bendungan Saradan	Analisis Stabilitas Tubuh Bendungan Pada Bendungan Utama Proyek Waduk Bendo Ponorogo.	Analisis Geoteknik Bendungan Gongseng Terhadap Keamanan Rembesan, Stabilitas Lereng, dan Beban Gempa.	Seepage and Slope Stability Analysis of Myittha Multipurpose Dam Project, Gangaw Township, Magway Region, Myanmar.	Analisis Stabilitas dan Rembesan Pada Bendungan Saradan

Lanjutan Tabel 2. 2 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Peneliti	Nanda & Hamdhan (2016)	Dipa. (2017)	Sholeh. (2019)	Imron, dkk. (2017)	Htwe & Naing (2017)	Saidillah. (2020)
Tujuan Penelitian	Mengetahui angka keamanan rembesan dan stabilitas yang terjadi pada bendungan bajulmati dengan metode elemen hingga menggunakan program komputer <i>PLAXIS AE</i> dengan model 2D dan 3D.	Mengetahui angka keamanan tubuh bendungan terhadap stabilitas dan rembesan pada kondisi muka air waduk kosong, normal, penuh dan surut cepat.	Mengetahui perhitungan analisis stabilitas pada tubuh bendungan pada bendungan utama proyek waduk Bendo Ponorogo dan perhitungan RAB untuk pembangunan <i>main dam</i> Bendungan Bendo.	Mengetahui angka keamanan bendungan gongseng terhadap rembesan, stabilitas lereng, dan beban gempa.	Analisis rembesan dan stabilitas lereng bendungan Myttha yang berada di Myanmar. Maksud dan tujuan penelitian ini adalah menganalisis rembesan dan stabilitas bendungan berdasarkan tiga kondisi yaitu : setelah konstruksi tanpa diisi air pada waduk, rembesan pada muka air normal, dan rapid drawdown pada waduk.	Mengetahui perhitungan angka keamanan bendungan terhadap stabilitas dan rembesan pada setiap kondisi .

Lanjutan Tabel 2. 3 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Peneliti	Nanda & Hamdhan (2016)	Dipa. (2017)	Sholeh. (2019)	Imron, dkk. (2017)	Htwe & Naing (2017)	Saidillah. (2020)
Metode Penelitian	Menggunakan Metode Elemen Hingga dan program komputer <i>Plaxis AE</i> .	Metode yang digunakan dalam penelitan ini yaitu menggunakan program komputer <i>Plaxis 8.2</i> , sedangkan untuk analisis rembesan digunakan metode casagrande dan metode pseudostatik dengan koefisien gempa termodifikasi.	Metode yang digunakan untuk perhitungan rembesan menggunakan rumus Cassagrande dan perhitungan stabilitas lereng menggunakan metode Fellenius yang dibantu dengan program <i>Geostudio 2012</i> .	Metode yang digunakan yaitu permodelan bangunan bendungan dengan program komputer <i>Plaxis 8.2</i> dan slope/w (Geo-Studio).	Untuk analisis manual, perhitungan rembesan dan stabilitas menggunakan rumus laplace berdasarkan hukum Darcy serta metode potongan dan metode bishop. Sedangkan untuk analisis menggunakan program komputer, penelitian ini menggunakan program komputer <i>SLOPE/W</i> dan <i>SEEP/W</i> .	Menggunakan Metode Bishop untuk perhitungan stabilitas dan untuk perhitungan rembesan menggunakan rumus cassagrande dengan dibantu program komputer <i>GeoStudio 2012</i> .

Lanjutan Tabel 2. 4 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Peneliti	Nanda & Hamdhan (2016)	Dipa. (2017)	Sholeh. (2019)	Imron, dkk. (2017)	Htwe & Naing (2017)	Saidillah. (2020)
Hasil Penelitian	Pada kondisi pembebanan after construction, muka air minimum, muka air maksimum dan surut cepat pada model 2D sebelum diberi beban gempa diperoleh nilai safety factor berturut-turut sebesar 2,088; 1,876; 1,965; 1,750 dan 1,823; 1,688; 1,461; 1,452 untuk hasil analisis setelah diberi beban gempa. Hasil faktor keamanan	Hasil Penelitian ini yaitu Dari dua stasiun bendungan tersebut, kondisi tanpa gempa, hasil <i>Plaxis</i> menunjukkan pada stasiun 03+50 dinyatakan tidak aman (SFizin = 1,5) dengan SF = 1,344 untuk kondisi muka air waduk kosong, SF = 1,318 akibat muka air waduk	Hasil penelitian ini dengan 3 metode : <i>curtain grouting</i> dengan kedalaman 39,83 m, <i>consolidated grouting</i> dengan kedalaman 5 m, dan <i>blanket grouting</i> dengan keadalam 15 m. Debit rembesan < 1% dari batas debit rembesan yang berarti aman, Kecepatan rembesan sebesar $7,3816 \times 10^{-7}$ m/detik < kecepatan kritis rembesan sebesar	Hasil penelitian didapatkan bahwa rembesan bendungan yang dianalisis dengan garis freatik dinyatakan aman, sedangkan pada analisis debit rembesan dan bahaya <i>boiling</i> dinyatakan tidak aman. Analisis stabilitas pada setiap kondisi muka air bendungan dinyatakan aman. Analisis stabilitas lereng terhadap beban gempa,	Hasil penelitian ini didapatkan bahwa bendungan aman terhadap rembesan dan stabilitas lereng bendungan pada setiap kondisi yang diteliti.	Hasil dari penelitian ini untuk kondisi muka air banjir didapatkan bahwa bendungan aman terhadap stabilitas, tetapi pada muka air banjir <i>downstream</i> dengan beban gempa <i>MDE</i> tidak aman. Pada kondisi muka air normal didapatkan bahwa bendungan aman dan pada kondisi muka air minimum didapatkan bendungan aman terhadap stabilitas, sedangkan pada kondisi <i>Rapid drawdown</i> dengan beban gempa bendungan tidak aman. Hasil dari analisis rembesan didapatkan bahwa bendungan saradan

Lanjutan Tabel 2. 5 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Peneliti	Nanda & Hamdhan (2016)	Dipa. (2017)	Sholeh. (2019)	Imron, dkk. (2017)	Htwe & Naing (2017)	Saidillah. (2020)
	<p>pada model 3D berurut-turut adalah sebesar 2,321 1,951; 2,103; 1,890 dan arah bidang longsor ke arah hulu, hulu, hilir dan hulu. Nilai faktor keamanan yang diperoleh dari model 2D dan 3D keseluruhannya memenuhi syarat keamanan berdasarkan RSNI-M-03-2002 dengan nilai syarat SF sebesar 1,1 s/d 1,5 (Badan</p>	<p>surut tiba-tiba dari muka air penuh, SF = 1,323 berdasarkan kondisi muka air waduk surut tiba-tiba dari muka air normal. Akibat gempa periode (T) = 100 th dinyatakan tidak aman (SFizin = 1,2) dengan SF = 1,029 untuk kondisi muka air waduk kosong, SF = 0,967 akibat</p>	<p>0,004017 m/detik dan $11,97 > 4$ yang berarti aman terhadap piping. Angka stabilitas lereng sebesar $3,331 > 1,5$ pada berbagai kondisi yang berarti aman. Hasil analisa perhitungan biaya dari pekerjaan timbunan utama dari pekerjaan persiapan sampai pekerjaan <i>grouting</i></p>	<p>dengan metode perhitungan koefisien gempa secara OBE periode ulang 100 tahun, menunjukkan hasil bahwa bendungan aman untuk empat posisi koefisien beban gempa, yaitu: $y/H = 1, 0,25, 0,5, 0,75$.</p>		<p>aman terhadap rembesan.</p>

Lanjutan Tabel 2. 6 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Peneliti	Nanda & Hamdhan (2016)	Dipa. (2017)	Sholeh. (2019)	Imron, dkk. (2017)	Htwe & Naing (2017)	Saidillah. (2020)
	Standarisasi Nasional, 2002).	muka air waduk surut tiba-tiba dari muka air penuh, SF = 0,994 berdasarkan kondisi muka air waduk surut tiba-tiba dari muka air normal. Sedangkan akibat gempa periode (T) = 3000 th dinyatakan tidak aman (SFizin = 1,0) dengan SF = 0,786 akibat muka air waduk	membutuhkan biaya sebesar Rp290.388.884.070,62.			

Lanjutan Tabel 2. 7 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Peneliti	Nanda & Hamdhan (2016)	Dipa. (2017)	Sholeh. (2019)	Imron, dkk. (2017)	Htwe & Naing (2017)	Saidillah. (2020)
		surut tiba-tiba dari muka air penuh, SF = 0,809 berdasarkan kondisi muka air waduk surut tiba-tiba dari muka air normal				

Sumber : Nanda & Hamdan (2016), Dipa (2017), Sholeh (2019), Imron dkk (2017), Htwe & Naing (2017), dan Saidillah (2020)

2.4 Keaslian Penelitian

Berdasarkan penyajian mengenai penelitian-penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya seperti pada Tabel 2.1, dapat disimpulkan bahwa penelitian ini sudah ada beberapa dilakukan penelitian di lokasi yang berbeda-beda. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai debit rembesan dengan metode Casagrande yang dibantu fitur *SEEP/W* dan mengetahui stabilitas lereng bendungan dengan perbandingan perhitungan manual menggunakan fitur *SLOPE/W* dengan metode Bishop sehingga bermanfaat bagi para perencana agar lebih mempertimbangkan keamanan pada tubuh bendungan yang aman.

Penelitian ini telah melewati tahap uji plagiasi, keaslian penelitian ini dapat dipertanggung jawabkan sesuai dengan asas-asas keilmuan yang ada antara lain kejujuran, objektif, rasional, dan terbuka. Hal ini bertujuan agar penelitian dapat dipertanggung jawabkan sesuai asas yang ada, bisa dipertanggung jawabkan kebenarannya secara ilmiah, keilmuan, dan terbuka terhadap kritikan yang konstruktif.

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1. Tanah

3.1.1 Umum

Menurut Hardiyatmo (2017) dalam pandangan teknik sipil, tanah adalah himpunan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang relatif lepas (*loose*), yang terletak di atas batuan dasar (*bedrock*). Proses pelapukan batuan atau proses geologi lainnya yang terjadi di dekat permukaan bumi membentuk tanah. Pembentukan tanah dari batuan induknya, dapat berupa proses fisik maupun kimia. Proses pembentukan tanah secara fisik yang mengubah batuan menjadi partikel-partikel yang lebih kecil, terjadi akibat pengaruh erosi, angin, air, es, manusia, atau hancurnya partikel tanah akibat perubahan suhu atau cuaca. Partikel-partikel mungkin berbentuk bulat, bergerigi maupun bentuk-bentuk diantaranya. Pelapukan akibat proses kimia dapat terjadi oleh pengaruh oksigen, karbondioksida, air (terutama yang mengandung asam atau alkali) dan proses-proses kimia lainnya. Jika hasil pelapukan masih berada di tempat asalnya, maka tanah ini disebut tanah residual (*residual soil*) dan apabila tanah berpindah tempatnya, disebut tanah terangkut (*transported soil*).

Istilah pasir, lempung lanau atau lumpur digunakan untuk menggambarkan ukuran partikel pada batas ukuran butiran yang telah ditentukan. Istilah yang sama juga digunakan untuk menggambarkan sifat tanah yang khusus. Sebagai contoh, lempung adalah jenis tanah yang bersifat kohesif dan plastis, sedang pasir digambarkan sebagai tanah yang tidak kohesif dan tidak plastis.

3.1.2 Pengertian Tanah Lempung

Menurut Bowles (1984), tanah lempung adalah partikel mineral yang berukuran lebih kecil dari 0,002 mm yang merupakan unsur utama dalam proses kohesif dalam tanah. Pada tanah lempung potensi kembang susut sangat dipengaruhi oleh kadar air tanah. Tanah akan mengembang disertai peningkatan

tekanan air pori apabila terjadi peningkatan kadar air, sedangkan bila kadar air berkurang tanah akan mengalami penyusutan.

3.2. Klasifikasi Tanah

Dalam banyak masalah teknis seperti perencanaan perkerasan jalan, bendungan dalam, urugan, dan lain-lainnya. Pemilihan tanah-tanah ke dalam kelompok ataupun sekelompok yang menunjukkan sifat atau kelakuan yang sama akan sangat membantu, pemilihan ini disebut klasifikasi. Klasifikasi tanah sangat membantu perancang dalam memberikan pengarahannya melalui cara empiris yang tersedia dari hasil pengalaman yang telah lalu.

Terdapat 2 sistem klasifikasi yang sering digunakan, yaitu Unified Soil Classification System dan AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Sistem-sistem ini menggunakan sifat-sifat indeks tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran, batas cair, dan indeks plastisitas.

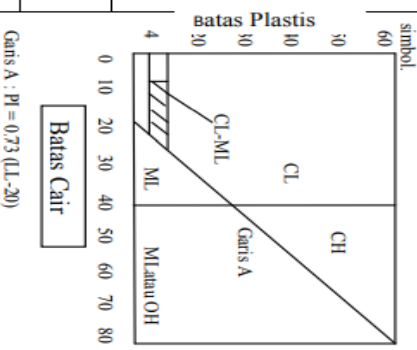
3.2.1 Sistem klasifikasi USCS

Klasifikasi tanah dari sistem USCS mula pertama diusulkan oleh Casagrande (1942) dalam Hardiyatmo (2006), kemudian direvisi oleh kelompok teknisi dari USBR (*United State Bureau of Reclamation*).

Pada sistem USCS, tanah diklasifikasikan ke dalam tanah berbutir kasar (kerikil dan pasir) jika kurang dari 50% lolos saringan nomer 200, dan sebagai tanah berbutir halus (lanau/lempung) jika lebih dari 50% lolos saringan nomer 200, selanjutnya tanah diklasifikasikan dalam sejumlah kelompok dan subkelompok yang dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Sistem Klasifikasi USCS

Tanah-tanah dengan kandungan organik sangat tinggi	Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos ayakan No. 200		Tanah berbutir kasar \geq 50% butiran tertahan saringan No. 200				Divisi Utama	Simbol	Nama Umum	Kriteria Klasifikasi					
	Lanau dan lempung batas cair \geq 50%	Lanau dan lempung batas cair $<$ 50%	Pasir \geq 50% fraksikasar lolos saringan No. 4		Kerikil 50% \geq fraksi kasar tertahan saringan No. 4										
			Pasir denganbutiran halus	Pasirbersih (hanyapasir)	Kerikildengan Butiranhalus	Kerikilbersih (hanyakerikil)									
PT	OH	CH	MH	OL	CL	ML	SC	SM	SP	SW	GC	GM	GP	GW	<p>Kerikilbergradasi-haluk dan campurankerikil-pasir, sedikitatau sekali tidakmengandungbutiranhalus</p> <p>Kerikilbergradasi-haluk dan campurankerikil-pasir, sedikitatau sama sekalitidakmengandungbutiranhalus</p> <p>Kerikilberlanau, campurankerikil-pasir-lanau</p> <p>Kerikilberlempung campurankerikil-pasir-lempung</p> <p>Pasirbergradasi-haluk, pasirberkerikil, sedikitatau sama sekalitidakmengandungbutiranhalus</p> <p>Pasirbergradasi-haluk.</p> <p>Pasirberkerikil, sedikitatau sama sekalitidakmengandungbutiranhalus</p> <p>Pasirberlempung, campuranpasir-lempung</p> <p>Pasirberlanau, campuranpasir-lanau</p> <p>Pasirberlempung, campuranpasir-lempung</p> <p>Lanauorganik, pasirhalussekali, serbukbatuan, pasirhalusberlanauatauberlempung</p> <p>Lanauorganikdenganplastisitas tinggi, lempungberpasir, lempungberlanau, lempung "kurus" (lean clays)</p> <p>Lanauorganikdenganplastisitas rendah</p> <p>Lanauorganikatau pasirhalusdi lanau, ataulanauorganik, lanau yang elastis</p> <p>Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung "gemuk" (fat clays)</p> <p>Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai dengan tinggi</p> <p>Peat (gambut), muck, dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi</p>
															<p>Klasifikasi berdasarkan prosentase butiran halus ; Kurang dari 5% lolos saringan no.200: GM, GP, SW, SP. Lebih dari 12% lolos saringan no.200 : GM, GC, SM, SC. 5% - 12% lolos saringan No.200 : Batas anklasifikasi yang mempunyai simbol doble</p> <p>Batas-batas Aterberg di bawah garis A atau $PI < 4$</p> <p>Batas-batas Aterberg di bawah garis A atau $PI > 7$</p> <p>$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$</p> <p>$D_{60}$</p> <p>$D_{10}$</p> <p>$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3</p> <p>Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW</p> <p>Batas-batas Aterberg di bawah garis A atau $PI < 4$</p> <p>Batas-batas Aterberg di bawah garis A atau $PI > 7$</p> <p>Bila batas Aterberg berada di daerah antara dua garis plastisitas, maka di prakalokasi simbol</p> <p>Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW</p> <p>Batas-batas Aterberg di bawah garis A atau $PI < 4$</p> <p>Batas-batas Aterberg di bawah garis A atau $PI > 7$</p> <p>Bila batas Aterberg berada di daerah antara dua garis plastisitas, maka di prakalokasi simbol</p>



Sumber: Hardiyatmo (2017)

3.2.2 Sistem klasifikasi AASHTO

Sistem klasifikasi AASHTO membagi ke dalam 7 kelompok besar yaitu A-1 sampai dengan A-7. Tanah berbutir dimana 35% atau kurang dari jumlah butiran tanah tersebut lolos saringan nomer 200 diklasifikasikan ke dalam kelompok A-1, A-2, dan A-3. Tanah berbutir dimana lebih dari 35% butiran tanah tersebut lolos ayakan No.200 diklasifikasikan ke dalam kelompok A-4, A-5, A-6, dan A-7. Butiran dalam kelompok A-4 sampai dengan A-7 tersebut sebagian besar adalah lanau dan lempung. Untuk mengklasifikasikan tanah berdasarkan sistem klasifikasi AASHTO, maka data yang didapat dari hasil uji laboratorium dicocokkan dengan angka-angka yang diberikan dalam Tabel 3.2 dan Tabel 3.3.

Tabel 3. 2 Tanah Granuler dalam Sistem Klasifikasi AASHTO

Klasifikasi umum	Tanah berbutir (35% atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No.200)						
Klasifikasi kelompok	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Analisis ayakan (% lolos) No.10 No.40 No.200	Maks 50 Maks 30 Maks 15	Maks 50 Maks 25	Min 51 Maks 10	Maks 35	Maks 35	Maks 35	Maks 35
Sifat fraksi yang lolos ayakan No.40 Batas Cair (LL) Indeks Plastisitas (PI)	Maks 6		NP	Maks 40 Maks 10	Min 41 Maks 10	Maks 40 Min 11	Min 41 Min 41
Tipe material yang paling dominan	Batu pecah, kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil dan pasir yang berlanau atau berlempung			

Sumber : Das (1995)

Tabel 3. 3 Tanah Berbutir Halus dalam Sistem Klasifikasi AASHTO

Penilaian sebagai bahan tanah dasar	Baik sekali sampai baik			
Klasifikasi umum	Tanah berbutir (Lebih dari 35% dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No.200)			
Klasifikasi kelompok	A-4	A-5	A-6	A-7
Analisis ayakan (% lolos) No.10 No.40 No.200	Min 36	Min 36	Min 36	Min 36
Sifat fraksi yang lolos ayakan No.40 Batas Cair (LL) Indeks Plastisitas (PI)	Maks 40 Maks 10	Maks 41 Maks 10	Maks 40 Maks 11	Min 41 Min 11
Tipe material yang paling dominan	Tanah berlanau		Tanah Berlempung	
Penilaian sebagai bahan tanah dasar	Biasa sampai jelek			

Sumber : Das (1995)

3.3. Bendungan

3.3.1 Umum

Secara umum yang dimaksud bendungan adalah bangunan berupa urugan tanah, urugan batu termasuk komposit, beton, dan atau pasangan batu yang dibuat untuk menahan air, limbah atau bahan cair lainnya sehingga terbentuk waduk. Secara umum yang dimaksud bendungan volume air yang dapat ditampung dalam kolam waduk bervariasi sesuai dengan kriteria bendungan (Departemen Pekerjaan Umum, 1989 dan 1997, serta Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2010 tentang Bendungan).

3.3.2 Bendungan Urugan

Menurut Sosrodarsono (1977), suatu bendungan yang dibangun dengan cara menimbunkan bahan-bahan seperti : batu, krakal, kerikil, pasir dan tanah pada komposisi tertentu dengan fungsi sebagai pengempang atau pengangkat permukaan air yang terdapat di dalam waduk di udiknya disebut bendungan tipe urugan atau "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*).disingkat dengan istilah "Bendungan batu".
2. Bendungan urugan tanah (*earth fill dam*) disingkat dengan istilah "Bendungan tanah".

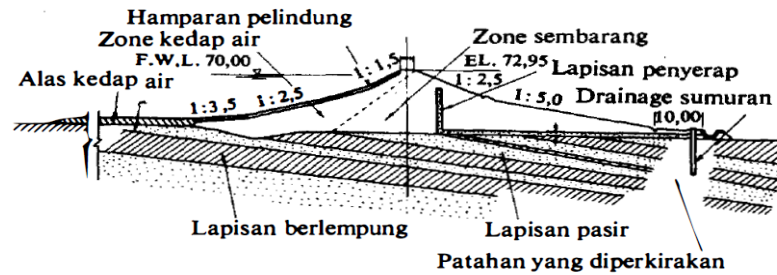
Selain kedua jenis tersebut, terdapat pula bendungan urugan campuran, yaitu terdiri dari timbunan batu di bagian hilirnya yang berfungsi sebagai penyangga, sedang bagian udiknya terdiri dari timbunan tanah yang disamping berfungsi sebagai penyangga tambahan, terutama berfungsi sebagai tirai kedap air.

3.3.3 Klasifikasi Bendungan Urugan

Sehubungan dengan fungsinya sebagai pengempang air atau pengangkat permukaan air di dalam suatu waduk, maka secara garis besarnya tubuh bendungan merupakan penahan rembesan air ke arah hilir serta penyangga tandonan air tersebut. Ditinjau dari penempatan serta susunan bahan yang membentuk tubuh bendungan untuk dapat memenuhi 'fungsinya dengan baik, maka bendungan urugan dapat digolongkan dalam 3 (tiga) type utama yaitu.

1. Bendungan Homogen

Bendungan homogen adalah suatu bendungan urugan digolongkan dalam tipe homogen, apabila bahan yang membentuk tubuh bendungan tersebut terdiri dari tanah yang hampir sejenis dan gradasinya (susunan ukuran butirannya) hampir seragam. Tubuh bendungan secara keseluruhannya berfungsi ganda, yaitu sebagai bangunan penyangga dan sekaligus sebagai penahan rembesan air. Potongan melintang bendungan urugan homogen dapat dilihat pada Gambar 3.1 sebagai berikut.

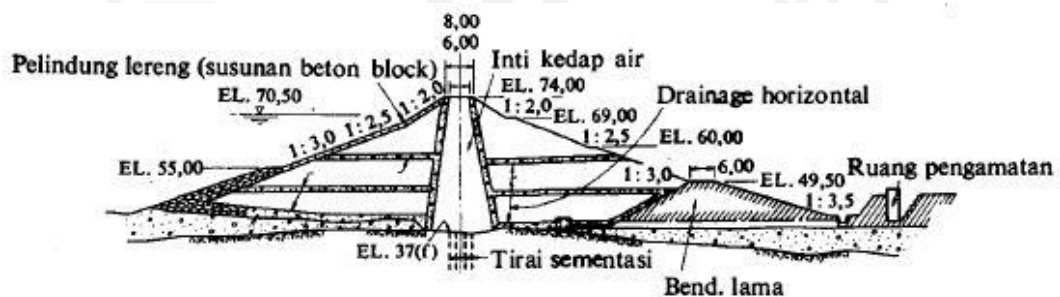


Gambar 3. 1 Potongan Melintang Bendungan Urugan Homogen

(Sumber : Sosrodarsono, 1977)

2. Bendungan Zonal

Bendungan urugan digolongkan dalam tipe zonal, apabila timbunan yang membentuk tubuh bendungan terdiri dari batuan dengan gradasi (susunan ukuran butiran) yang berbeda-beda dalam urutan-urutan pelapisan tertentu. Pada bendungan tipe ini sebagai penyangga terutama dibebankan kepada timbunan yang lulus air (zone lulus air), sedang penahan rembesan dibebankan kepada timbunan yang kedap air (zone kedap air). Potongan melintang bendungan urugan zonal dapat dilihat pada Gambar 3.2 sebagai berikut.



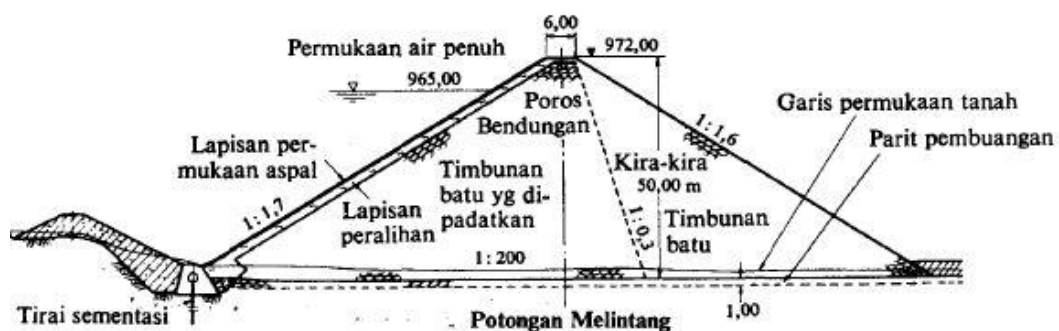
Gambar 3. 2 Potongan Melintang Bendungan Urugan Zonal

(Sumber : Sosrodarsono, 1977)

3. Bendungan Bersekat

Bendungan urugan digolongkan dalam tipe sekat (*facing*) apabila di lereng udik tubuh bendungan dilapisi dengan sekat tidak lulus air (dengan kekedapan yang tinggi) seperti lembaran baja tahan karat, beton aspal, lembaran beton bertulang, hamparan plastik, susunan beton blok, dan lain-lain. Potongan

melintang bendungan urugan bersekat dapat dilihat pada Gambar 3.3 sebagai berikut.



Gambar 3. 3 Potongan Melintang Bendungan Urugan Bersekat

(Sumber : Sosrodarsono, 1977)

3.4. Rembesan

3.4.1 Umum

Rembesan adalah air waduk yang mencari jalannya melalui material yang porus atau suatu rekahan baik yang ada di dalam tubuh maupun fondasinya, karena pada dasarnya air yang disimpan di dalam suatu waduk akan cenderung mencari jalan keluar (mengalir) ke bagian hilirnya. Setiap bendungan pasti mengalami rembesan dari waduknya, namun besarnya pengaruh rembesan terhadap bendungan sangat tergantung pada material timbunan tubuh bendungan. Rembesan berlebihan mungkin dapat berpengaruh terhadap keamanan bendungannya.

3.4.2 Persamaan Darcy

Henri Darcy seorang ahli hidrolika dari Perancis mengadakan suatu percobaan aliran air yang melalui suatu lapisan tanah. Darcy berpendapat bahwa besarnya kecepatan aliran yang mengalir masuk ataupun keluar dari lapisan tanah sebanding dengan gradien hidrauliknya. Hukum Darcy dapat digunakan untuk menghitung debit rembesan yang melalui struktur bendungan. Dalam merencanakan sebuah bendungan, perlu diperhatikan stabilitasnya terhadap

bahaya longsor. erosi lereng dan kehilangan air akibat rembesan yang melalui tubuh bendungan. Beberapa cara diberikan untuk rnenentukan besamya rembesan yang melewati bendungan yang dibangun dan tanah homogen. Berikut ini disajikan beberapa cara untuk menentukan debit rembesan.

Hukum Darcy dinyatakan dalam persamaan 3.1, 3.2, dan 3.3 sebagai berikut.

$$Q = k.i.A \quad (3.1)$$

$$V = k.i \quad (3.2)$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (3.3)$$

Dengan :

Q = volume aliran air persatuan waktu yang masuk ataupun keluar (m^3/s),

k = konstanta yang dikenal sebagai koefisien permeabilitas (cm/s),

V = kecepatan rembesan (cm/s),

i = gradien hidrolik,

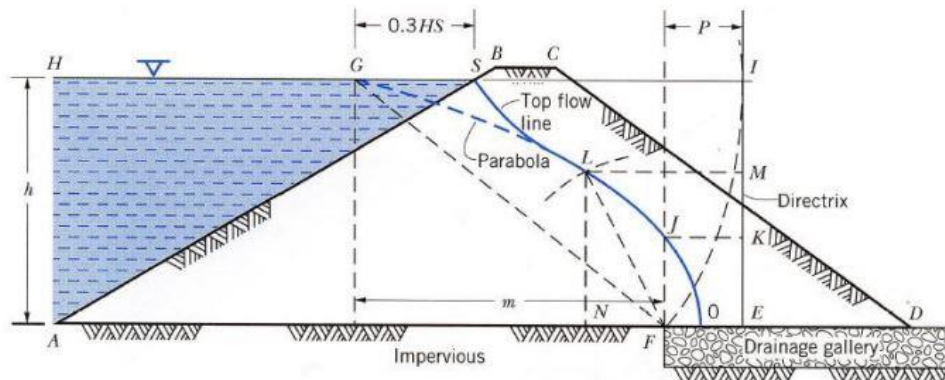
A = luas penampang tanah yang dilewati (m^2),

Δh = perbedaan tinggi muka air pada kedua ujung contoh tanah (m),

L = panjang lapisan tanah yang dirembesi (m).

3.4.3 Garis Freatik

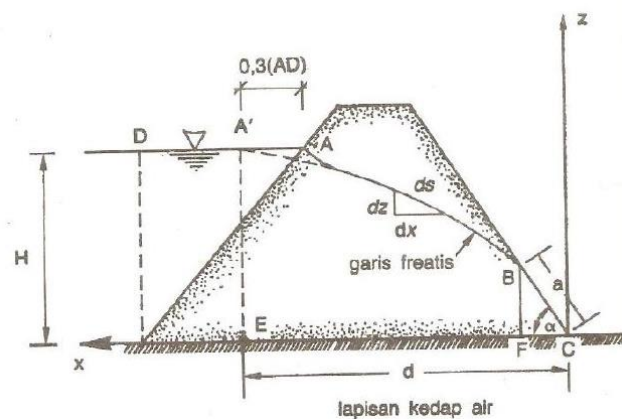
Garis freatik adalah garis aliran air yang berhubungan dengan bidang imajiner dalam tubuh dan pondasi bendungan yang tekanan air dan porinya sama dengan tekanan atmosfer. Jaringan aliran untuk bendungan tanah yang fondasinya berupa tanah yang kedap air dapat digambarkan mengikuti prosedur yang telah dibicarakan terdahulu, hanya saja haruslah diperhatikan beberapa hal. Contoh potongan melintang garis freatik pada bendungan urugan dapat dilihat pada Gambar 3.2 sebagai berikut.



Gambar 3. 4 Potongan Melintang Garis Freatik Pada Bendungan Urugan
(Sumber : Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, 2017)

3.4.4 Metode Casagrande

Perhitungan menggunakan metode Casagrande memberikan cara untuk menghitung rembesan lewat tubuh bendungan yang berasal dari pengujian model. Parabola AB berawal dari titik A' seperti yang diperlihatkan pada gambar, dengan $A'A = 0,3 \times AD$. Pada modifikasi ini, nilai d yang digunakan dalam 4 persamaan akan merupakan jarak horizontal antara titik E dan C (Hardiyatmo, 2017).



Gambar 3. 5 Hitungan Rembesan Cara Casagrande
(Sumber : Hardiyatmo, 2017)

Besarnya debit rembesan dapat ditentukan dengan persamaan 3.4 dan 3.5 sebagai berikut.

$$q = k a \sin^2 \alpha \quad (3.4)$$

$$a = \sqrt{(d^2 + H^2)} - \sqrt{(d^2 - H^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha)} \quad (3.5)$$

Dengan :

q = debit rembesan (m^3 / det)

k = koefisien permeabilitas (m/det)

α = sudut hilir tanggul ($^\circ$)

d = jarak horizontal antara E dan C (m)

a = panjang zona basah (m)

H = tinggi muka air (m)

3.4.5 Keamanan Rembesan Bendungan

Keamanan Rembesan yang terjadi pada bendungan mengikuti Pedoman *Grouting Untuk Bendungan Departemen Pekerjaan Umum-SDA* yang mengacu pada batasan yang berlaku di Jepang (*Japanese Institute of Irrigation and Drainage 1988*) nilai angka rembesan yang diperkenankan pada bendungan yaitu sebanyak total rembesan dari waduk yang melewati pondasi dan badan bendungan tidak boleh lebih dari 1% rata-rata debit sungai yang masuk ke dalam waduk. Batas aman rembesan berdasarkan debitnya mengikuti Pedoman *Grouting Untuk Bendungan Departemen Pekerjaan Umum -SDA* yang mengacu pada batasan yang berlaku di Jepang (*Japanese Institute of Irrigation and Drainage 1988*) nilai angka rembesan yang diperkenankan pada bendungan yaitu sebanyak total rembesan dari waduk yang melewati pondasi dan badan bendungan tidak boleh lebih dari 1% rata-rata debit sungai yang masuk ke dalam waduk.

Menurut Hardiyatmo (2017) menyatakan bahwa nilai faktor keamanan bangunan air berupa perbandingan antara nilai gradien hidrolis kritis dengan gradien keluar maksimum harus lebih besar dari 3 sampai dengan 4. Syarat

keamanan bendungan berdasarkan gradien hidrolis dirumuskan pada persamaan 3.6, 3.7, dan 3.8 sebagai berikut.

$$\text{Syarat Keamanan : } \frac{i_c}{i_e} > 3 \text{ s/d } 4 \quad (3.6)$$

$$\text{Gradien Hidrolis Kritis} = i_c = \frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (3.7)$$

$$\text{Gradien Keluar Maksimum} = i_e = \frac{h}{B} \quad (3.8)$$

Dengan :

γ' = Berat Volume Terapung

γ_w = Berat Volume air

i_c = Gradien hidrolis dari material

i_e = Gradien hidrolis debit

G_s = Berat jenis tanah

e = Angka pori

3.5. Stabilitas

3.5.1 Pengertian Stabilitas

Stabilitas bendung yaitu perhitungan kontruksi untuk menentukan ukuran bendung agar mampu menahan muatan dan gaya yang bekerja padanya dalam segala kondisi, dalam hal ini termasuk terjadinya angin kencang dan gempa bumi hebat dan banjir besar serta keadaan yang lainnya. Syarat-syarat stabilitas kontruksi seperti lereng disebelah hulu dan hilir bendung tidak mudah longsor, harus aman terhadap geseran, harus aman terhadap rembesan, dan harus aman terhadap penurunan bendung.

Desain suatu bendungan tipe urugan yang menahan air dalam volume yang besar, harus mempertimbangkan faktor keamanan terhadap pengaruh kestabilan

lereng bendungan. Ketidakstabilan lereng adalah salah satu bentuk masalah stabilitas untuk bendungan urugan. Kondisi lainnya yang membahayakan stabilitas bendungan urugan adalah deformasi berlebihan, tegangan berlebihan, limpasan (overtopping), dan erosi internal. Bentuk-bentuk ketidakstabilan bendungan urugan ini dapat terjadi pada kondisi beban biasa (normal) dan beban luar biasa.

Analisis stabilitas lereng analisis kestabilan lereng dapat dilakukan dengan berbagai cara, yang pada umumnya dapat dibagi menjadi 3 kelompok, yaitu:

1. Pengamatan visual,
2. Penggunaan komputasi, dan
3. Penggunaan grafik.

3.5.2 Metode Bishop

Metode Bishop adalah metode yang diperkenalkan oleh A.W. Bishop dengan menggunakan cara potongan dimana gaya-gaya yang bekerja pada tiap potongan dipakai untuk menganalisis permukaan gelincir (*slip surface*) yang berbentuk lingkaran. Metode ini diasumsikan bahwa gaya-gaya normal total berada/bekerja dipusat alas potongan dan bisa ditentukan dengan menguraikan gaya-gaya pada potongan secara vertikal atau normal. Persyaratan keseimbangan harus dipakai pada potongan-potongan yang membentuk lereng tersebut. Keseimbangan gaya-gaya pada metode bishop terhadap garis vertikal harus memenuhi persamaan 3.9 sebagai berikut.

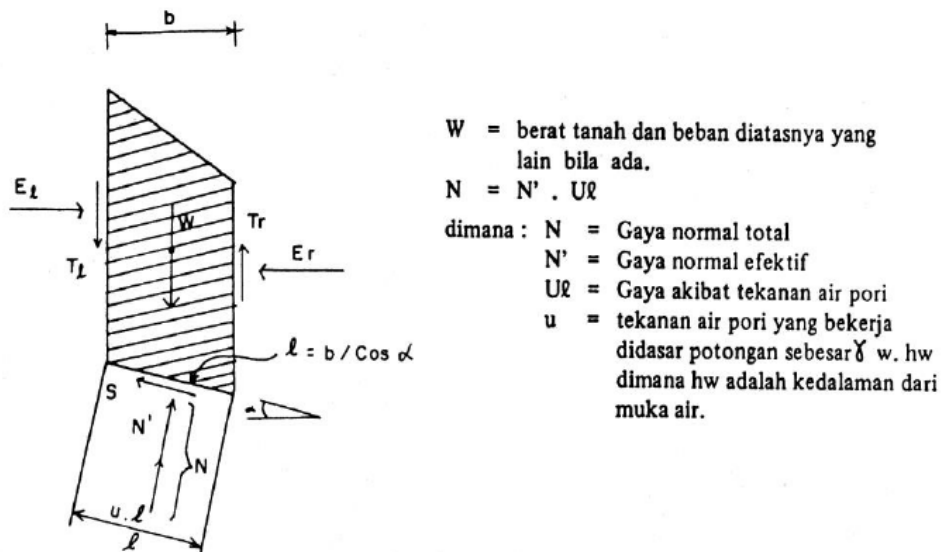
$$F = \frac{\sum_{i=1}^n [c' b_i + W_i (1 - r_u) \tan \phi'] \left(\frac{1}{\cos \theta_i \left(\frac{1 + \tan \theta_i \tan \phi'}{F} \right)} \right)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i} \quad (3.9)$$

Dengan :

- F = Faktor Keamanan
 Θ = Sudut irisan
 c' = Kohesi tanah efektif (kN/m²)
 b_i = Lebar irisan tanah ke-i (kN)

- W_i = Berat irisan tanah ke- i (kN)
 φ = Sudut gesek dalam efektif
 μ_i = Tekanan air pori irisan ke- i (kN/m²)

Analisis A.W. Bishop (1955) menggunakan cara elemen dan gaya yang bekerja pada tiap elemen. Persyaratan keseimbangan diterapkan pada elemen yang membentuk lereng tersebut.



Gambar 3. 6 Sistem Gaya Pada Suatu Elemen Menurut Bishop

(Sumber: Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, 2017)

3.5.1. Kriteria Nilai Faktor Keamanan Stabilitas Lereng Bendungan

Gambaran kondisi kewanaman lereng bendungan diberikan dari hasil analisis stabilitas lereng bendungan berupa nilai Faktor Keamanan (FK). (Standar Nasional Indonesia, SNI 8064:2016 (Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Urugan), 2016) membahas tentang analisis stabilitas lereng statik bendungan tipe urugan dengan kriteria nilai faktor keamanan untuk berbagai kondisi bendungan, yang terdapat pada Tabel 3.4 sebagai berikut.

Tabel 3. 4 Kriteria Faktor Keamanan Minimum untuk Stabilitas Bendungan Tipe Urugan

NO	Kondisi	Kuat Geser	Tekanan Air pori	FK Tanpa Gempa	FK dengan Gempa *
1	Selesai Kontruksi tergantung : 1.Jadwal kontruksi 2. Hubungan antara tekanan air pori dan waktu Lereng U/S dan D/S Dengan gempa tanpa kerusakan digunakan 50% koefisien gempa desain	1.Efektif	Peningkatan tekanan air pori pada urugan dan fondasi dihitung menggunakan data lab. Dan pengawasan instrument.	1.3	1.2
			Idem hanya tanpa pengawasan instrument	1.4	1.2
			Hanya pada urugan tanpa dan dengan/tanpa pengawasan instrumen	1.3	1.2
		2.Total	Tanpa Pengawasan	1.3	1.2
2	Aliran Langgeng tergantung : 1.Evaluasi muka air normal sebelah udik. 2.Elevasi muka air sebelah hilir. Lereng/U/S dan D/S dengan gempa tapa kerusakan digunakan 100% 100f koef gempa desain.	1.Efektif	Dari analisis rembesan	1.5	1.2
3	Pengoperasi waduk tergantung : 1.Elevasi muka air maksimum di udik. 2.Elevasi muka air minimum di udik (<i>dead storage</i>) lereng U/S harus dianalisis untuk kondisi surut cepat.	1.Efektif	Surut cepat dari EL muka air normal sampai El. Muka air minimum lereng U/S dan D/S.	1.3	1.1
			Surut cepat dari El.MA maksimum sampai El.MA minimum. Pengaruh gempa diambil 0% dari koefisien gempa desain.	1.3	
4	Kondisi darurat tergantung : 1.Pembuntuan pada system drainase.	1.Efektif	Surut cepat dari El.MA maksimum sampai EL.	1.2	

Lanjutan Tabel 3. 5 Kriteria Faktor Keamanan Minimum untuk Stabilitas Bendungan Tipe Urugan

NO	Kondisi	Kuat Geser	Tekanan Air pori	FK Tanpa Gempa	FK dengan Gempa *
	2.Surut cepat karena penggunaan air melebihi kebutuhan. 3.Surut cepat keperluan daruuarat.		Terendah bangunan pengeluaran. Pengaruh gempa diabaikan.		
*Catatan : Periksa standar tentang metode analisis stabilitas dinamik bendungan tipe urugan. *)untuk OBE ; sedangkan **)untuk MDE, $FK \geq 1$					

Sumber : SNI 8064:2016 (Metode Analisis Stabilitas LerengStatikBendungan Urugan)

3.6. Beban Gempa

3.6.1 Umum

Beban gempa merupakan beban atau gaya inersia yang timbul sebagai akibat adanya guncangan gempa di permukaan tanah. Perhitungan nilai beban gempa dilakukan dengan mengikuti pedoman konstruksi dan bangunan analisis stabilitas bendungan dengan tipe urugan akibat beban gempa berdasarkan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Pd T-14-2004-A).

3.6.2 Jenis Gempa

1. Gempa Dasar Operasi (*Operating Basis Earthquake, OBE*)
OBE adalah gempa dengan batasan guncangan di permukaan tanah pada lokasi studi dengan 50% adanya kemungkinan tidak terlampaui dalam 100 tahun dan sebaiknya ditentukan secara probabilistik.
2. Gempa Desain Maksimum (*Maximum Design Earthquake, MDE*)
MDE adalah gempa yang menghasilkan guncangan terbesar di lokasi studi yang akan digunakan sebagai desain atau analisis.

3.6.3 Pengaruh Tingkat Risiko Bangunan

Penentuan mengenai pengaruh tingkat resiko bangunan dilakukan dengan tinjauan-tinjauan sebagai berikut.

1. Klasifikasi kelas risiko

Parameter yang digunakan dalam penentuan klasifikasi kelas risiko didapatkan berdasarkan data teknis bendungan, paramaternya total dapat dilihat pada persamaan 3.10 sebagai berikut.

$$FR_{total} = FR_k + FR_t + FR_e + FR_h \quad (3.10)$$

Dengan :

FR_k = Faktor risiko kapasitas tamping

FR_t = Faktor risiko tinggi bendungan

FR_e = Faktor risiko kebutuhan evakuasi

FR_h = Faktor risiko tingkat kerusakan

Untuk penentuan klasifikasi kelas risiko berdasarkan paramaternya dapat dilihat pada Tabel 3.5 sebagai berikut.

Tabel 3. 6 Kriteria Faktor Risiko Untuk Evaluasi Keamanan Bendungan

Faktor Risiko	Angka bobot dalam kurung				
	Ekstrema	Tinggi		Moderat	Rendah
Kapasitas (106 m ³) (FR _k)	>100 (6)	100-1,25 (4)		1,00-0,125 (2)	0,125 (0)
Tinggi (m) (FR _t)	>45 (6)	45-30 (4)		30-15 (2)	<15 (0)
Kebutuhan Evakuasi (jumlah orang) (FR _e)	>1000 (12)	1000-100 (8)		100-1 (4)	0 (0)
Tingkat Kerusakan (FR _h)	Sangat Tinggi (12)	Tinggi (10)	Agak Tinggi (8)	Moderat (4)	Tidak Ada (0)

Sumber : Pedoman Kontruksi Dan Bangunan Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan(PdT-14-2004-A)

2. Kriteria beban gempa

Kriteria beban gempa ditentukan berdasarkan nilai parameter faktor risiko total dan kelas risikonya, untuk penentuan kelas risiko dan kriteria beban gempa untuk desain bendungan dapat dilihat pada Tabel 3.6 sebagai berikut.

Tabel 3. 7 Kelas Risiko Bendungan dan Bangunan Air

Faktor Risiko Total	Kelas Risiko
(0-6)	I (Rendah)
(7-18)	II (Moderat)
(19-30)	III (Tinggi)
(31-36)	IV (Ekstrem)

Sumber :Pedoman Kontruksi Dan Bangunan Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan (PdT-14-2004-A)

3.6.4 Koefisien Gempa

Koefisien gempa ditentukan nilai percepatan gempa maksimum terkoreksi (*peak ground acceleration*, PGA). Perhitungan koefisien bebangempa menggunakan Persamaan 3.11. Peta Gempa yang digunakan yaitu Peta Gempa 2017 .

$$PGAM = FPGa \times SPGA \quad (3.11)$$

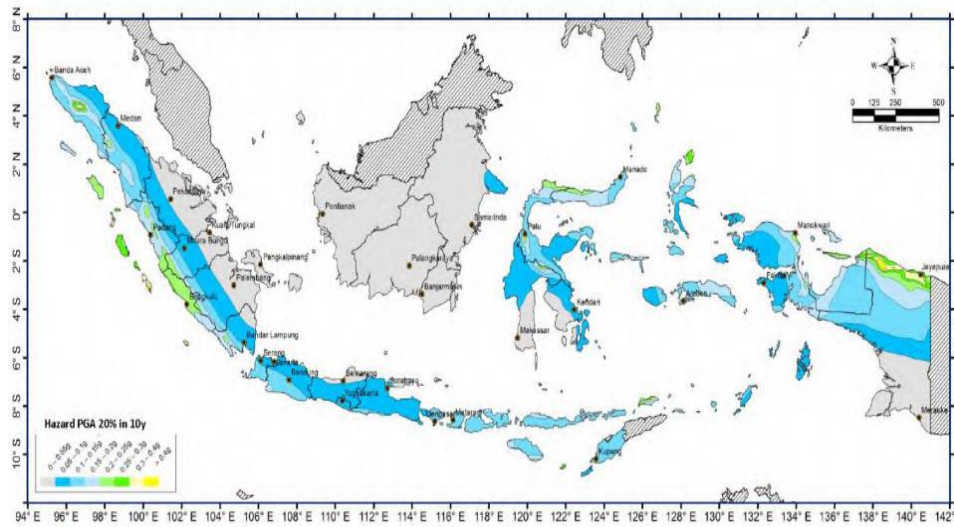
Dengan :

PGAM = Percepatan puncak di permukaan tanah

FPGA = Faktor amplikasi untuk PGA

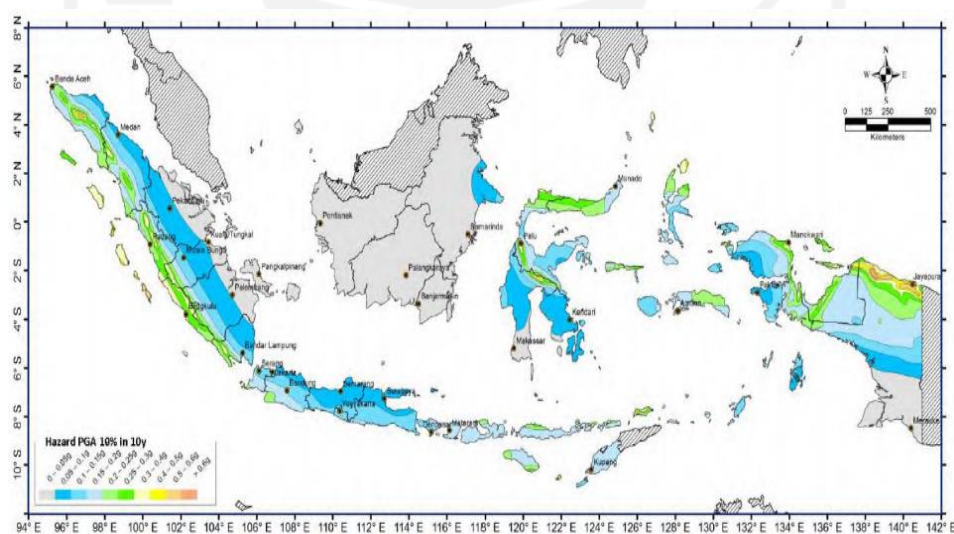
SPGA = Percepatan tanah di permukaan

Peta gempa yang digunakan adalah peta gempa tahun 2017 yang dapat dilihat pada gambar 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 dan 3.10 sebagai berikut.



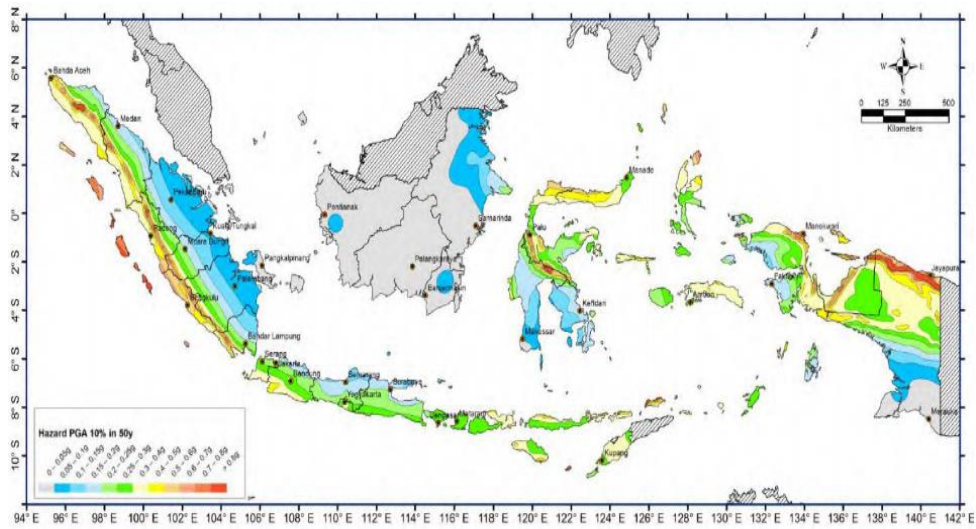
Gambar 3. 7 Peta Percepatan Puncak Batuan dDsar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 20% dalam 10 tahun

(Sumber : Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017)



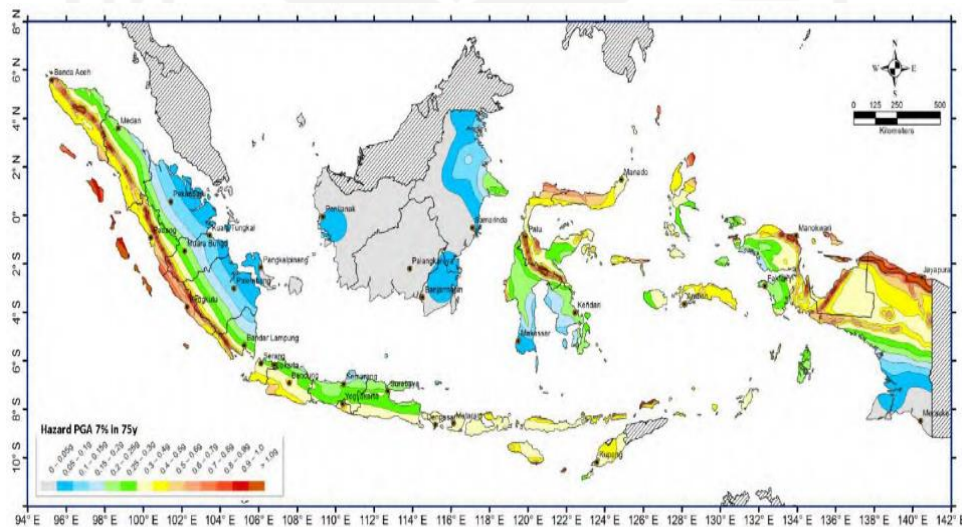
Gambar 3. 8 Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 10% dalam 10 tahun

(Sumber : Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017)



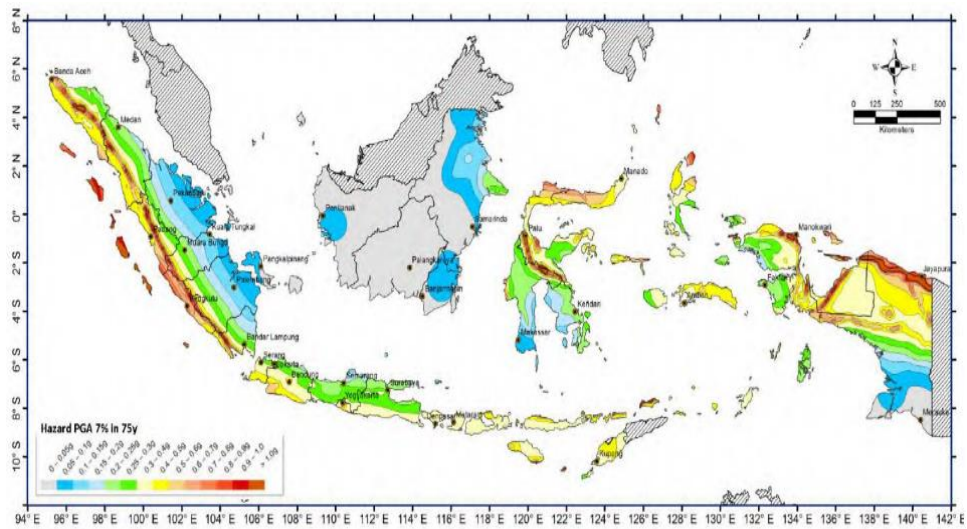
Gambar 3. 9 Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 10% dalam 50 tahun

(Sumber : Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017)



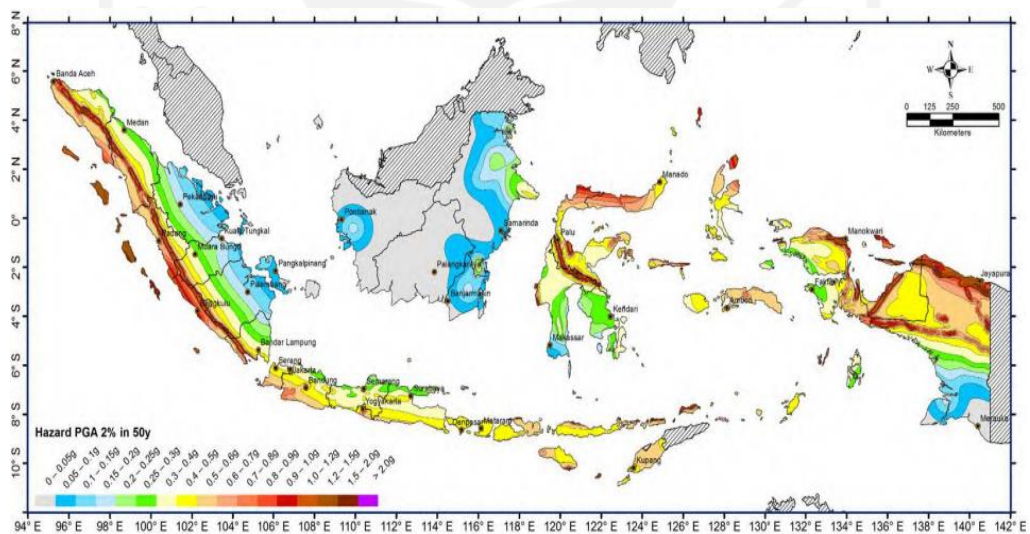
Gambar 3. 10 Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 7% dalam 75 tahun

(Sumber : Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017)



Gambar 3. 11 Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 2% dalam 50 tahun

(Sumber : Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017)



Gambar 3. 12 Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 2% dalam 100 tahun

(Sumber : Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017)

Gaya gempa ini berarah horizontal, kearah yang berbahaya, dengan garis kerja yang melewati titik berat kontruksi. Sudah tentu juga akan ada komponen

vertikal, tetapi relatif tidak akan berbahaya dibandingkan dengan komponen yang horizontal. Harga f tergantung dari lokasi tempat konstruksi sesuai dengan peta zona gempa, koefisien jenis tanah untuk beban gempa dapat dilihat pada Tabel 3.7 sebagai berikut.

Tabel 3. 8 Faktor Amplikasi (FPGA)

Kelas situs	S_{PGA}				
	PGA :: 0.1	PGA = 0.2	PGA = 0.3	PGA = 0.4	PGA = 0.5
Batuan Keras (SA)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Batuan (SB)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Tanah Keras (SC)	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
Tanah Sedang (SD)	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
Tanah Lunak (SE)	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
Tanah Khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

Sumber : SNI 8460:2017

1. Cara Koefisien Gempa

Cara ini dilakukan dengan menghitung koefisien gempa dan gaya-gaya vibrasi yang bekerja dengan arah yang berubah-ubah yang diganti dengan satu gaya statik mendatar, seperti Persamaan 3.12 dan 3.13 sebagai berikut.

$$K_h = \frac{PGA_M}{g} \quad (3.12)$$

$$K = \alpha_1 \times K_h \quad (3.13)$$

Dengan :

PGA_M = Percepatan puncak di permukaan tanah

α_1 = Koreksi Pengaruh Daerah Bebas (*Freefield*) (bendungan tipe urugan : 0,7. namun, untuk Bendungan Beton Dan Pasangan Batu : 1)

K = Koefisien gempa terkoreksi untuk analisis stabilitas.

g = Gravitasi (980 cm/det).

Dalam penentuan prosedur analisis yang dianjurkan dalam tahapan analisis ini dapat dilihat pada Tabel 3.8 sebagai berikut.

Tabel 3. 9 Penentuan Prosedur Analisis

Kelas Risiko	Tinggi bendungan $H \leq 15$		Tinggi bendungan $H > 15$ m	
	$ad \leq 0,25g$	$ah > 0,25g$	$ad \leq 0,25g$	$ad > 0,25g$
Persyaratan tanpa kerusakan (OBE)				
I	Ea	Ea	Eb	Eb
II	Ea	Ea	Eb	Eb
III	Ea	Ea	Eb	Eb
IV	Tidak ada	Tidak ada	Eb	Eb
Persyaratan yang diperkenankan ada kerusakan tanpa keruntuhan (MDE)				
I	Ea	Ec	Eb	Ec
II	Ea	Ec	Eb	Ec
III	Ea	Ec	Eb	Ec
IV	Tidak ada	Tidak ada	Eb	Ec

Sumber : Pedoman Kontruksi Dan Bangunan Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan (Pd T-14-2004-A)

3.7. Parameter Tanah

3.7.1 Koefisien Permeabilitas

Koefisien permeabilitas adalah propterti tanah yang menunjukkan kemampuan tanah untuk meloloskan air melalui pori-porinya. Tanah pada kondisi jenuh dimana rongga-rongga pada tanah akan terisi oleh air, ketika terjadi perubahan kondisi tanah yang awalnya jenuh berubah menjadi tidak jenuh maka rongga-rongga tanah akan terisi oleh udara yang mengakibatkan kemampuan tanah meloloskan air akan berkurang. Pada saat tekanan air pori pada tanah menajdi negatif, maka semakin banyak pula rongga yang akan terisi oleh udara dan koefisien permeabilitas akan menjadi berkurang. Koefisien permeabilitas dapat dihitung dengan Persamaan 3.14 dan 3.15 sebagai berikut.

$$Q = k \times A \times i \times t \quad (3.14)$$

$$k = \frac{(Q \times L)}{(h \times A \times t)} \quad (3.15)$$

Dengan :

Q = Debit (cm³/det)

k = Koefisien Permabilitas (cm/det)

A = Luas Penampang (cm²)

i = Koefisien Hidrolik = H/L

t =Waktu (detik)

3.7.2 Kuat Geser Tanah

Kekuatan geser tanah merupakan perlawanan internal tanah tersebut per satuan luas terhadap keruntuhan atau pergeseran sepanjang bidang geser dalam tanah yang dimaksud. Tujuan dari pengujian geser langsung dan pengujian triaksial UU adalah untuk mengetahui kekuatan tanah terhadap gaya horizontal, dengan menentukan nilai kohesi (c) dari sudut geser dalam(ϕ) dari suatu contoh tanah pada bidang geser tertentu.

Coulomb (1776) mendefinisikan kuat geser pada Persamaan 3.16 sebagai berikut.

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (3.16)$$

Dengan :

τ = Kuat geser tanah (kN/m²)

c = Kohesi tanah (kN/m²)

φ = Sudut geser dalam tanah (derajat)

σ = Tegangan normal (kN/m²)

3.7.3 Sudut Geser Tanah

Sudut geser dalam merupakan sudut yang dibentuk dari hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser di dalam material tanah atau batuan. Sudut geser dalam adalah sudut rekahan yang dibentuk jika suatu material dikenai tegangan atau gaya terhadapnya yang melebihi tegangan gesernya. Semakin besar sudut geser dalam suatu material maka material tersebut akan lebih tahan menerima tegangan luar yang dikenakan terhadapnya. Besaran nilai sudut geser dalam (φ) juga berkaitan dengan tingkat kepadatan suatu jenis tanah, yang dapat dilihat pada Tabel 3.9 sebagai berikut.

Tabel 3. 10 Besaran Sudut Geser Dalam Tanah

Tingkat Kepadatan	Sudut Geser Dalam (φ)
Sangat lepas	< 30
Lepas	30 -35
Agak padat	35 – 340
Padat	40 – 45
Sangat Padat	> 45

Sumber: Bowles (1989)

3.8. GeoStudio

3.8.1 Umum

GeoStudio adalah perangkat lunak pemodelan untuk insinyur geospasial dan ilmuwan geologi. Kemampuan untuk menganalisis secara akurat dan mengintegrasikan alat-alat khusus dan terapan di bidang rekayasa geofisika dan ilmu bumi telah menjadikan perangkat lunak ini alat yang baik di antara para ahli di bidang ini.

Karena GeoStudio, sebagai seperangkat alat canggih, menggabungkan sejumlah program khusus, memungkinkan Anda untuk menggabungkan berbagai analisis yang Anda dapatkan dari berbagai alat ke dalam proyek pemodelan, dan Gunakan hasil masing-masing untuk membuat survei yang lebih rinci di survei lainnya. GeoStudio mencakup program-program berikut:

1. *SLOPE/W*, Program untuk menganalisis stabilitas lereng.
2. *SEEP/W*, Program Analisis Pemisahan Air Tanah.
3. *SIGMA/W*, Program Analisis perangkat lunak untuk ketegangan dan deformasi.
4. *QUAKE /W*, Program analisis dinamis gempa.
5. *TEMP/W*, Program untuk analisis geotermal.
6. *CTRW Relay*, Program Analisis Transmisi.
7. *AIR/W*, Program Analisis Aliran Udara.

3.8.2 Program *SLOPE/W*

SLOPE/W adalah program komputer yang menggunakan teori limit equilibrium dalam perhitungan faktor keamanan lereng. Formula yang komprehensif membuat program komputer ini dapat melakukan analisis-analisis mengenai permasalahan yang berkaitan dengan stabilitas lereng dengan berbagai macam metode perhitungan faktor keamanan.

SLOPE/W sendiri menyediakan berbagai macam metode perhitungan faktor keamanan lereng yang dapat dipilih sesuai dengan keinginan, diantaranya yaitu metode Fellenius, Bishop, Janbu, dan Spencer. Pada analisisnya bergantung pada

variabel-variabel yang di input seperti kohesi, sudut geser, berat jenis, kondisi tekanan air pori, pembebanan, dan lain-lain.

3.8.3 Program *SEEP/W*

SEEP/W adalah program komputer berbasis elemen hingga untuk analisis aliran air yang berada pada suatu material berporos seperti tanah dan batuan. Program komputer *SEEP/W* dapat memodelkan baik aliran saturated maupun unsaturated. Dengan *SEEP/W*, pengguna dapat mendapatkan gambaran garis freatik pada tubuh material sesuai dengan koefisien permabilitas material tersebut.



BAB IV

METODE PENELITIAN

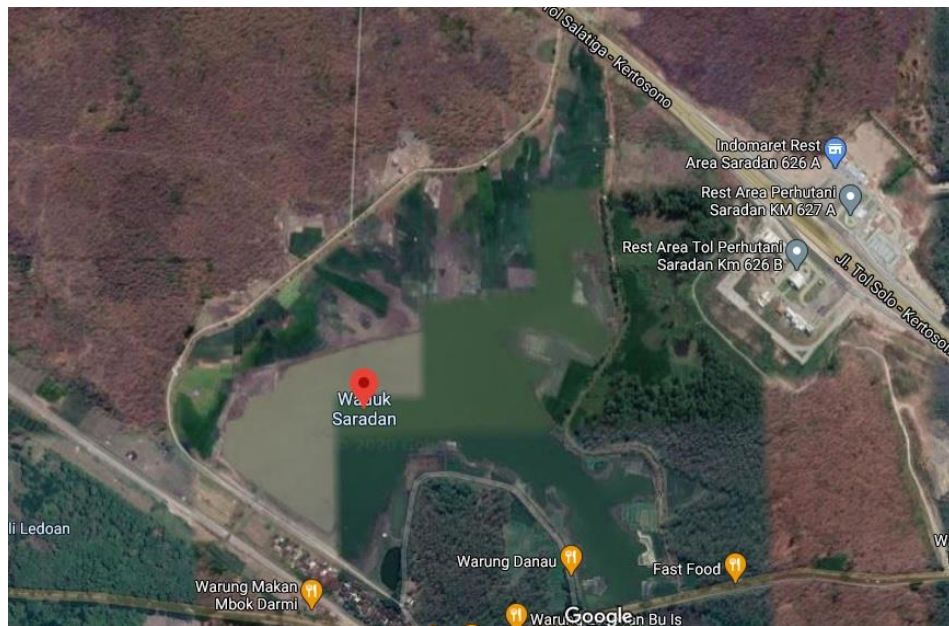
4.1 Tinjauan Umum

Metode penelitian ini merupakan suatu cara yang dilakukan untuk dapat mengetahui jawaban dari permasalahan yang telah diajukan. Pelaksanaan metode penelitian dilakukan dengan serangkaian pengujian tanah di laboratorium sesuai dengan data-data yang telah didapatkan. Penelitian ini dilaksanakan berdasarkan buku-buku, jurnal dan standar pengujian yang dilakukan pada bidang geoteknika.

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis stabilitas dan rembesan Bendungan Saradan pada kondisi yang berbeda, penelitian ini akan dibantu dengan program computer yaitu *SLOPE/W* dan *SEEP/W* dalam melakukan analisisnya. *SLOPE/W* adalah program computer yang biasanya digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng, sedangkan *SEEP/W* adalah program computer yang digunakan untuk analisis rembesan. Dari hasil analisis, diharapkan dapat mengetahui stabilitas dan rembesan yang terjadi pada Bendungan Saradan.

4.2 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada di Desa Pajaran, Kecamatan Saradan, Kabupaten Madiun, Provinsi Jawa Timur. Untuk lokasi waduk Saradan dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Lokasi Waduk Saradan
(Sumber : *Google Maps*, 2020)

4.3 Data Penelitian

Dalam penelitian ini ada beberapa data-data yang diperlukan, data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder sebagai berikut.

1. Data Teknis Bendungan

Data teknis Bendungan Saradan dapat dilihat pada Tabel 4.1 sebagai berikut.

Tabel 4. 1 Data Teknis Bendungan Saradan

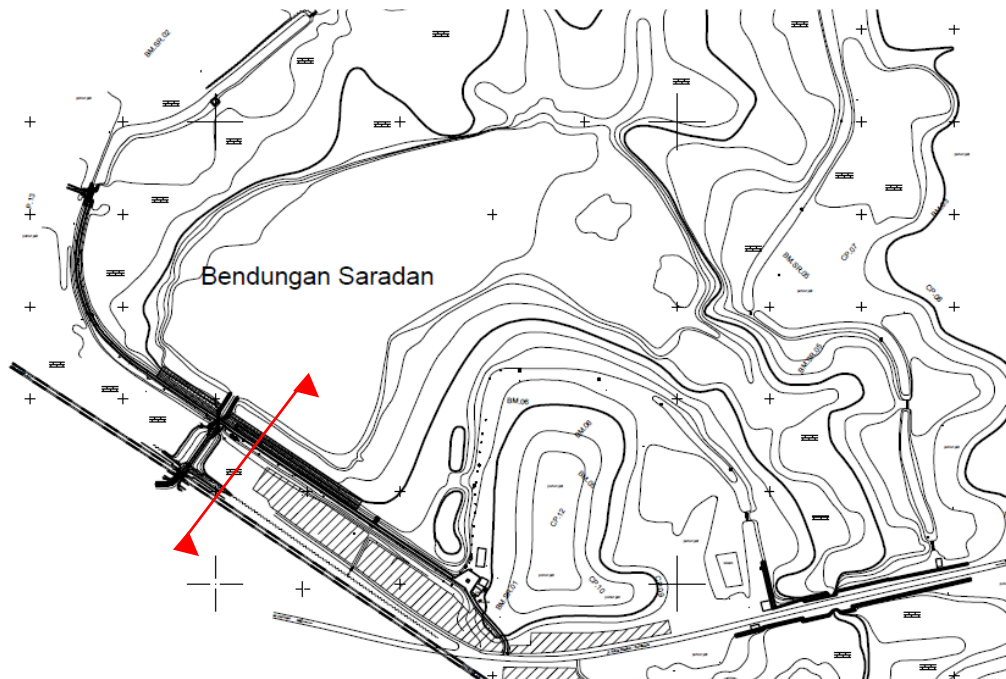
Umum	
a. Lokasi	Desa Pajaran, Kecamatan Saradan, Kabupaten Madiun, Provinsi Jawa Timur
b. Manfaat	Irigasi dan Pariwisata
c. Tahun konstruksi	1942
d. Pengelola	BBWS Bengawan Solo

Waduk	
a. Elevasi dan luas MA	
1) MA Banjir	El. +118,63 m
2) MA Normal	El. +118,00 m
3) MA Minimum	El. +113,15 m
b. Volume Waduk	
1) MA Banjir	1,904 juta m ³
2) MA Normal	1,594 juta m ³
3) Vol. Mati	-
Bendungan	
a. Tipe	Urugan tanah homogen
b. Tinggi dari dasar sungai	8,40 m
c. Panjang puncak	730 m
d. Lebar puncak	3,00 m s/d 6,00 m
e. Elevasi puncak	El. +119,00 m
Pelimpah	
a. Tipe	Ogee tanpa pintu
b. Elevasi mercu	El. +118,00 m
c. Lebar mercu	10,8 m
Bangunan Pengambilan	
a. Tipe	Slide gate, tangkai spindle
b. Panjang stang spindle	7,50 m
c. Lebar pintu	1.00 m

d. Tinggi pintu	0,80 m
e. Jumlah pintu	1 buah
g. Head	Maksimum 8,4 m
h. Kapasitas	5,33 m ³ /detik
Instrumentasi	
a. Pisometer pipa tegak	9 buah (3 miring)
b. Patok geser	3 buah (3 rusak)
c. Pemantau tinggi muka air waduk	2 buah
d. Pengukur debit pengeluaran	1 buah (ambang lebar)
e. Stasiun Hujan	1 buah (manual)

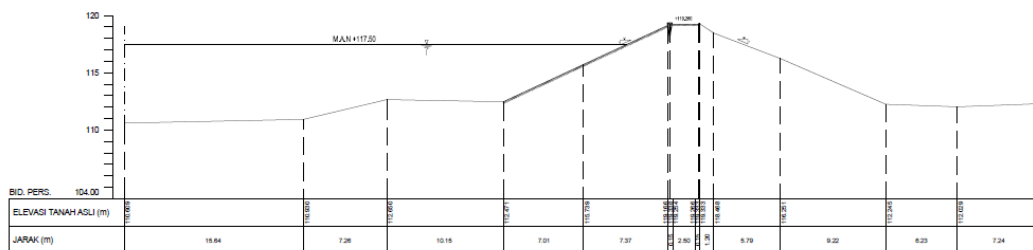
2. Data geometri bendungan

Data geometri Bendungan Saradan yaitu peta situasi, potongan melintang bendungan Saradan Pada Sta.10 dan titik uji bor bendungan Saradan yang dapat dilihat pada Gambar 4.2, Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 sebagai berikut.



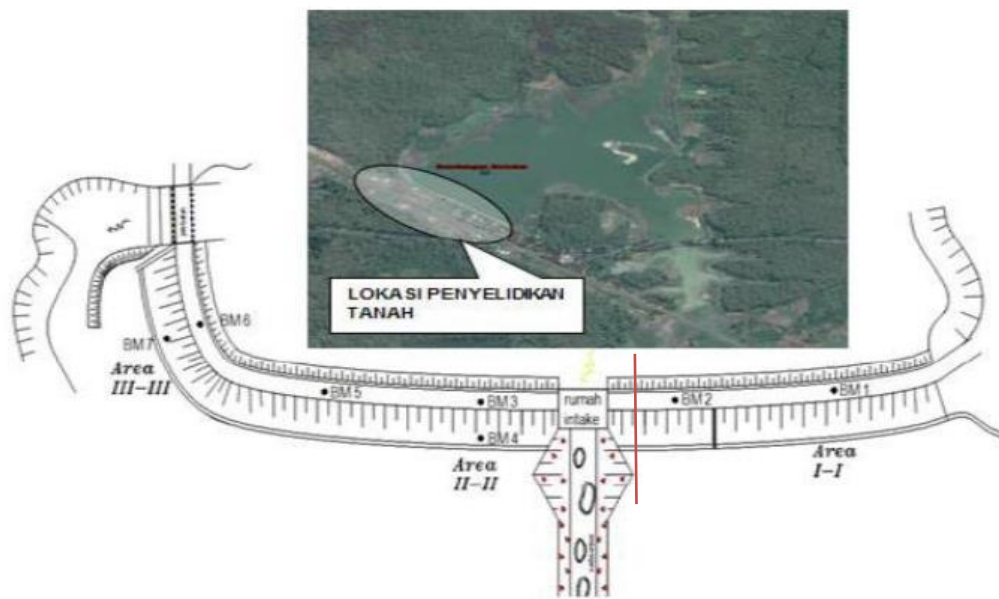
Gambar 4. 2 Peta Situasi Bendungan Saradan

(Sumber: PT. Multimera Harapan, 2020)



Gambar 4. 3 Potongan Melintang Sta.10 Bendungan Saradan

(Sumber: PT. Multimera Harapan, 2020)



Gambar 4. 4 Titik Uji Pemboran Bendungan Saradan

(Sumber: PT. Multimera Harapan)

3. Data tanah

Data tanah pada Bendungan Saradan dapat dilihat pada Tabel 4.2 sebagai berikut.

Tabel 4. 2 Data Tanah pada Bendungan Saradan

No	Jenis Parameter	Bagian Zona Bendungan			
		Tubuh Bendungan	Pondasi Bendungan		
1	Jenis Tanah			Lanau Lempung	Pasir Lempung
2	NSPT			7 - 9	30 - >30
3	Klasifikasi USCS (Cassagrande)			MH	SM
4	Berat Jenis (Gs)			2,649 - 2,688	2,523 - 2,7
5	Kadar air asli (W _n)	%		25,82 - 42,12	22,85 - 42,22
6	Berat isi basah (γ _n)	gr/cm ³		1,685 - 1,779	1,632 - 1,783
7	Berat isi kering (γ _d)	gr/cm ³		1,187 - 1,365	1,183 - 1,435
8	Indeks plastisitas	%		21,22 - 29,33	8,11 - 24,98
9	Gradasi ukuran butir : - Kerikil	%		0 - 9,67	0 - 13,85
	- Pasir	%		8,70 - 60,82	6,42 - 89,81

	-Lanau	%	29,51 - 79,34	21,44 - 80,55
	- Lempung	%	0 - 17,32	0 - 16,3
10	Triaxial – UU : Kohesi (c)	kg/cm ²	0,05 - 0,2	0,1 - 0,4
	Sudut geser dalam (ϕ)	°	13,26 - 19,17	15,22 - 21,94
11	Triaxial – CU : Kohesi efektif (c')	kg/cm ²	0,11 - 0,21	0,16 - 0,39
	Sudut geser dalam efektif (ϕ')	°	14,40 - 21,57	18,39 - 24,74
12	Konsolidasi : Indeks kompresi (Cc)		0,233 - 0,299	0,216 - 0,263
	Konsolidasi (Cv)	cm ² /det	1,367 - 3,272	1,450 - 3,077
13	Koefisien Permeabilitas (insitu)	cm/det	8,87E-10 - 1,45E-08	2,47E-09 - 2,33E-08

Sumber : PT. Multimera Harapan (2020)

4.4 Metode Penelitian

1. Metode Casagrande

Metode Casagrande adalah metode yang digunakan dalam perhitungan rembesan Bendungan Saradan. Untuk lebih lengkapnya dapat dilihat pada 3.4.4.

2. Metode Bishop

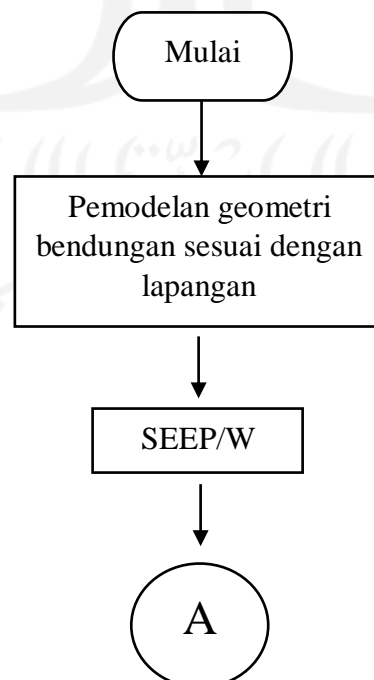
Metode Bishop adalah metode yang digunakan dalam perhitungan stabilitas lereng Bendungan Saradan. Untuk lebih lengkapnya dapat dilihat pada 3.5.2.

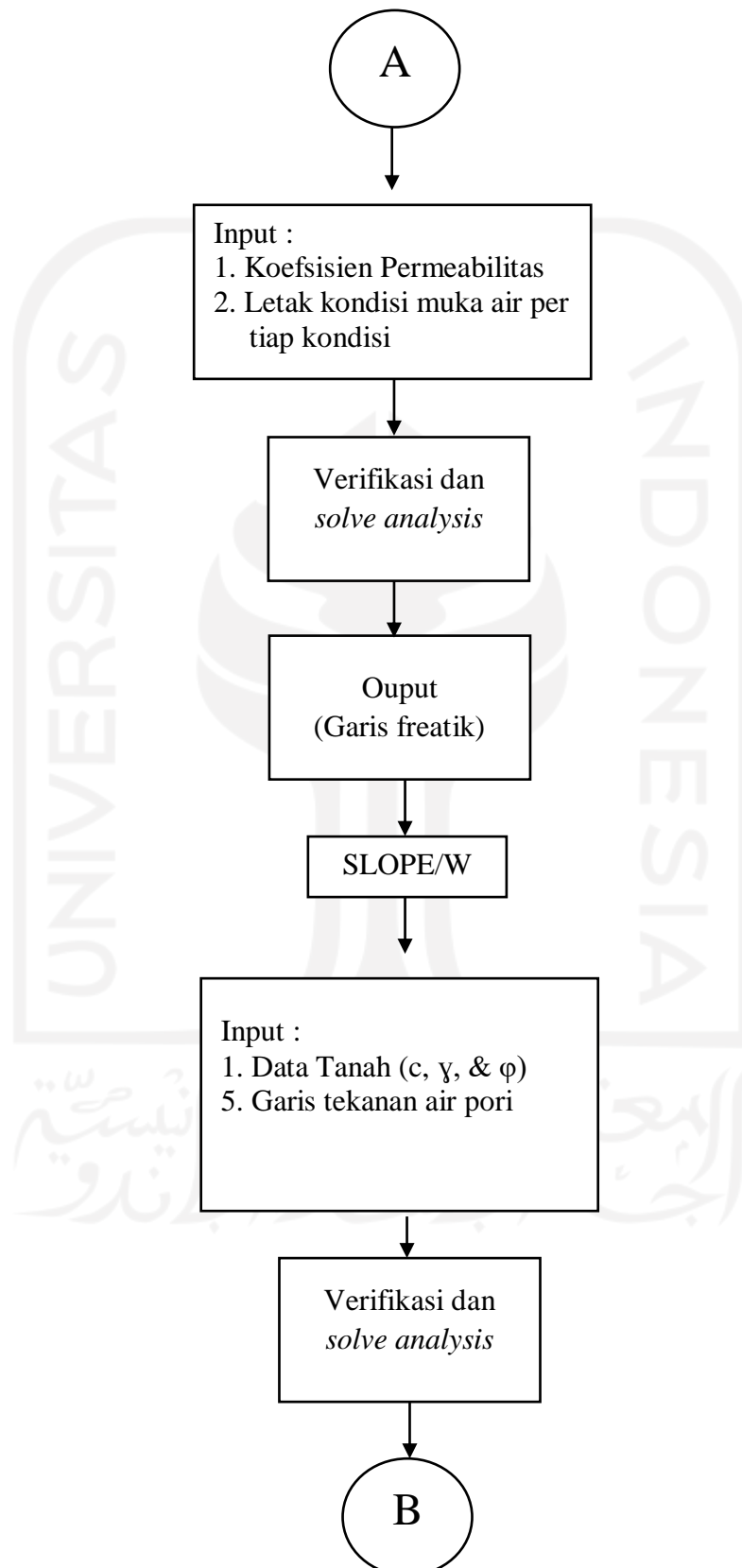
3. Metode Pemodelan Software

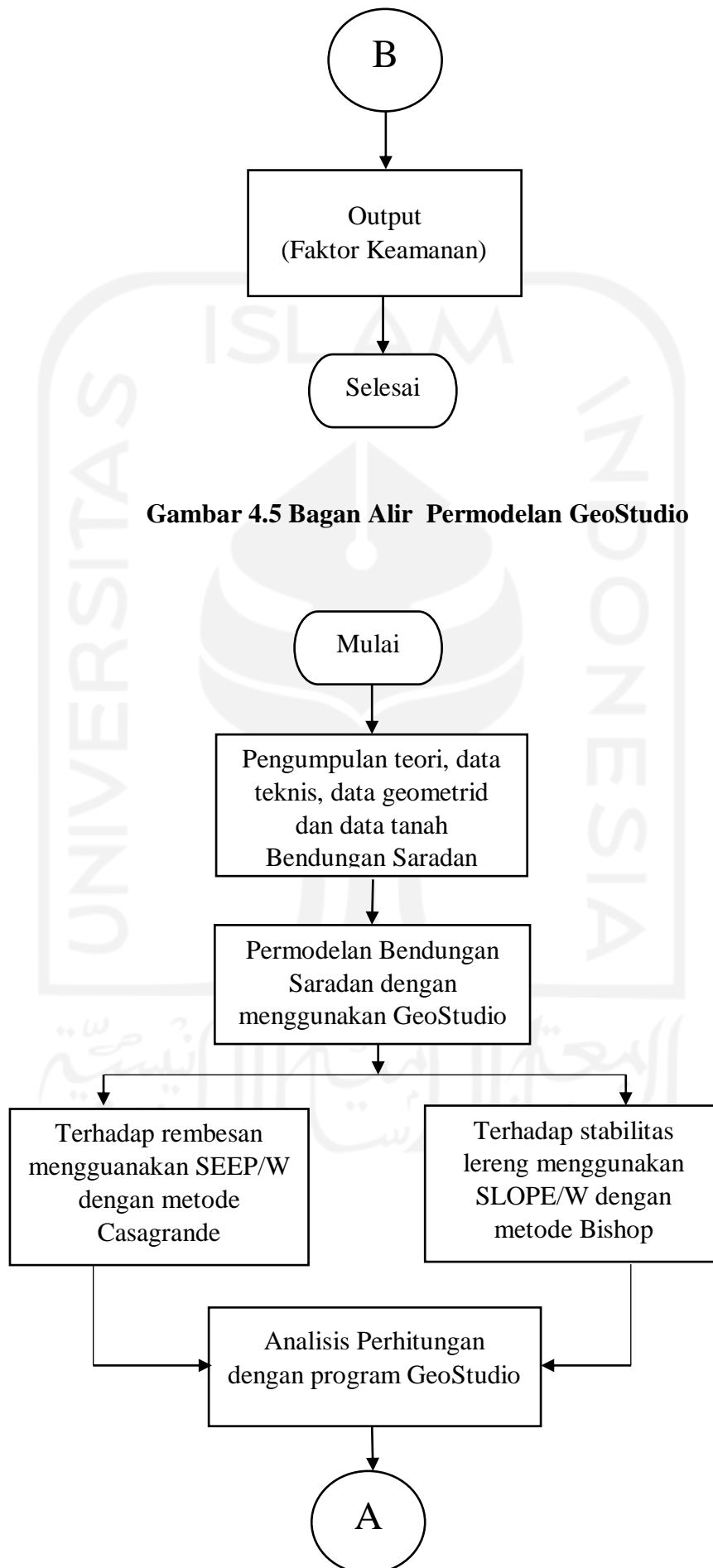
Metode Pemodelan Software pada penelitian ini menggunakan GeoStudio, dimana untuk perhitungan rembesan menggunakan program SEEP/W dan perhitungan stabilitas menggunakan program SLOPE/W. Untuk lebih lengkapnya dapat dilihat pada 3.8.

4.5 Bagan Alir Penelitian

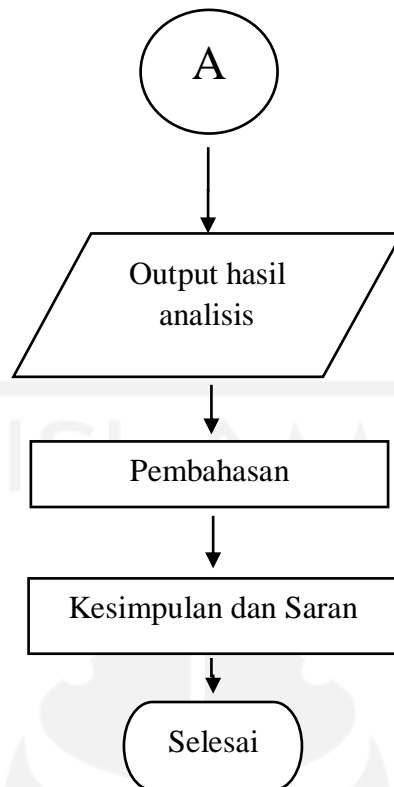
Bagan Alir Penelitian dan bagan alir pemodelan GeoStudio dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 sebagai berikut.







Gambar 4.5 Bagan Alir Permodelan GeoStudio



Gambar 4.6 Bagan Alir Penelitian

BAB V

ANALISIS DAN PERHITUNGAN

5.1 Analisis Tingkat Resiko Bendungan

Penentuan tingkat risiko bertujuan untuk menentukan klasifikasi kelas risiko, berikut ini hasil analisis risiko Bendungan Saradan yang dapat dilihat pada Tabel 5.1.

Tabel 5. 1 Tingkat Risiko Bendungan Saradan

No	Faktor Risiko		Kategori	Nilai
1	Faktor risiko kapasitas tampung (frk)	2,04 juta m ³	tinggi	4
2	Faktor risiko tinggi bendungan (FRt)	8,40 m	rendah	0
3	Faktor risiko kebutuhan evakuasi (Fre)	>1000	ekstreme	12
4	Faktor risiko tingkat kerusakan (FRh)	tinggi	tinggi	10
Jumlah				26

Setelah didapatkan nilai faktor risiko selanjutnya yaitu menentukan kriteria beban gempa dengan menentukan kelas risiko. Berdasarkan perhitungan tingkat risiko bendungan Saradan memiliki nilai 26. Sehingga dengan berdasarkan Tabel 3.6, bendungan Saradan termasuk kelas risiko III (Tinggi).

Bendungan Saradan tergolong bendungan kelas risiko III (Tinggi) sehingga kriteria beban gempa untuk desain bendungan untuk gempa OBE menggunakan

tahun kala ulang 100 tahun sedangkan untuk gempa MDE menggunakan kala ulang gempa 5.000 tahun.

5.2 Menghitung Koefisien Gempa

Pada perhitungan nilai beban gempa dilakukan berdasarkan nilai koefisien pada peta gempa sesuai dengan jenis gempa OBE dan MDE, untuk peta gempa OBE yang dipakai dapat dilihat pada Gambar 3.8 dan untuk peta gempa MDE yang dipakai dapat dilihat pada Gambar 3.12.

Pada kondisi gempa (OBE) diambil nilai PGAM sebesar 0.1 dan kondisi gempa (MDE) diambil nilai PGAM sebesar 0,4 dilakukan perhitungan sebagai berikut.

a. Perhitungan gempa OBE :

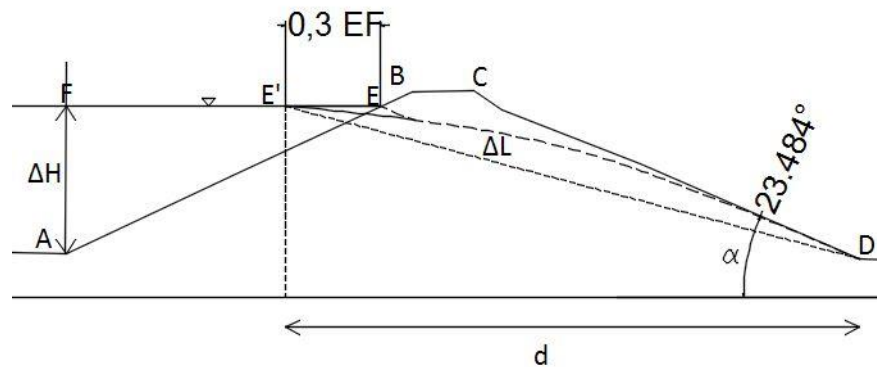
$$\begin{aligned} \text{PGAM} &= 0,1 \\ g &= 0,981 \text{ dm/s}^2 \\ f &= 0,1/0,981 \\ &= 0,1019 \text{ g} \\ \alpha &= 0,7 \\ K &= 0,1019 \times 0,7 \\ &= 0,07135 \text{ g} \end{aligned}$$

b. Perhitungan gempa MDE :

$$\begin{aligned} \text{PGAM} &= 0,4 \\ g &= 0,981 \text{ dm/s}^2 \\ f &= 0,4/0,981 \\ &= 0,4077 \text{ g} \\ \alpha &= 0,7 \\ K &= 0,4077 \times 0,7 \\ &= 0,2854 \text{ g} \end{aligned}$$

5.3 Perhitungan Manual Rembesan Bendungan Dengan Metode Casagrande

5.3.1 Rembesan pada Muka Air Banjir



Gambar 5. 1 Hitungan Rembesan Metode Casagrande pada Kondisi Muka Air Banjir

1. Debit Rembesan

Perhitungan debit rembesan dengan menggunakan metode casagrande pada kondisi muka air banjir dengan panjang bendungan sebesar 730 m, dihitung sebagai berikut.

$$H_{hulu} = 8,021 \text{ m}$$

$$H^2_{Hulu} = 64,336 \text{ m}$$

$$\alpha = 23,48$$

$$\tan \alpha = 0,4343$$

$$\cot^2 \alpha = 5,2992$$

$$\sin \alpha = 0,3984$$

$$\sin^2 \alpha = 0,1587$$

$$k = 1,45E-10 \text{ m/det}$$

$$d = 24.131 \text{ m}$$

$$d^2 = 582.9562 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{(d^2 + H^2)} - \sqrt{d^2 - H^2 \times \cot^2 \alpha} \\ &= \sqrt{(582,3051 + 64,336)} - \sqrt{582,3052 - 64,336 \times 5,2992} \\ &= 9,892 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{total}} &= k \times a \times \sin^2 \alpha \times \text{Panjang Bendungan} \\ &= 1,45 \times 10^{-10} \times 9,892 \times 0,1587 \times 730 \\ &= 1,66 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{det} \end{aligned}$$

Maka didapatkan hasil debit rembesan total (Q_{total}) pada kondisi muka air banjir didapatkan nilai rembesan sebesar $1,66 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{det}$.

2. Gradien Hidrolik

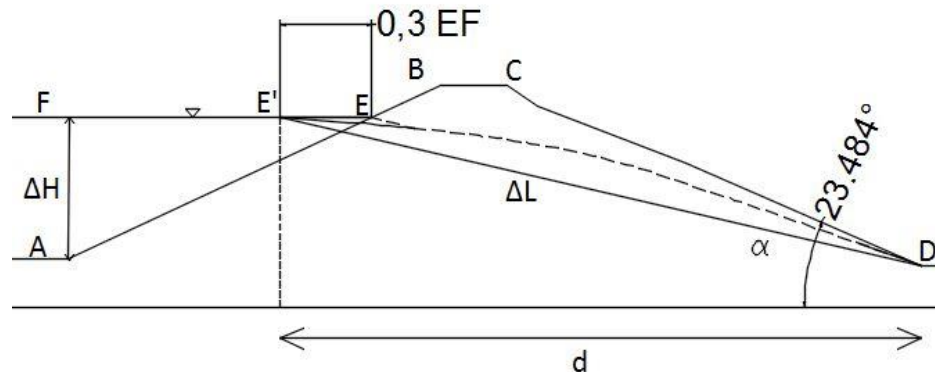
Perhitungan rembesan berdasarkan gradien hidrolik didapatkan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} i_{\text{exit}} &= \frac{8,021}{21,15} \\ &= 0,379 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_c &= \frac{2,68-1}{1+1,26} \\ &= 0,743 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SF &= \frac{0,743}{0,379} \\ &= 1,96 \end{aligned}$$

5.3.2 Rembesan pada Muka Air Normal



Gambar 5. 2 Hitungan Rembesan Metode Casagrande pada Kondisi Muka Air Normal

1. Debit Rembesan

Perhitungan debit rembesan dengan menggunakan metode casagrande pada kondisi muka air normal dengan panjang bendungan sebesar 730 m, dihitung sebagai berikut.

$$H_{hulu} = 7,319 \text{ m}$$

$$H^2_{Hulu} = 53,567 \text{ m}$$

$$\alpha = 23,48$$

$$\tan \alpha = 0,4343$$

$$\cot^2 \alpha = 5,2992$$

$$\sin \alpha = 0,3984$$

$$\sin^2 \alpha = 0,1587$$

$$k = 1,45E-10 \text{ m/det}$$

$$d = 25,079 \text{ m}$$

$$d^2 = 628,956 \text{ m}$$

$$a = \sqrt{(d^2 + H^2)} - \sqrt{d^2 - H^2 \times \cot^2 \alpha}$$

$$= \sqrt{(628,956 + 53,567)} - \sqrt{628,956 - 53,567 \times 5,2992}$$

$$= 7,447 \text{ m}$$

$$Q_{\text{total}} = k \times a \times \sin^2 \alpha \times \text{Panjang Bendungan}$$

$$= 1,45 \times 10^{-10} \times 7,447 \times 0,1587 \times 730$$

$$= 1,25 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{det}$$

Maka didapatkan hasil debit rembesan total (Q_{total}) pada kondisi muka air banjir didapatkan nilai rembesan sebesar $1,25 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{det}$.

2. Gradien Hidrolik

Perhitungan rembesan berdasarkan gradien hidrolik didapatkan sebagai berikut.

$$i_{\text{exit}} = \frac{7,319}{22,274}$$

$$= 0,328$$

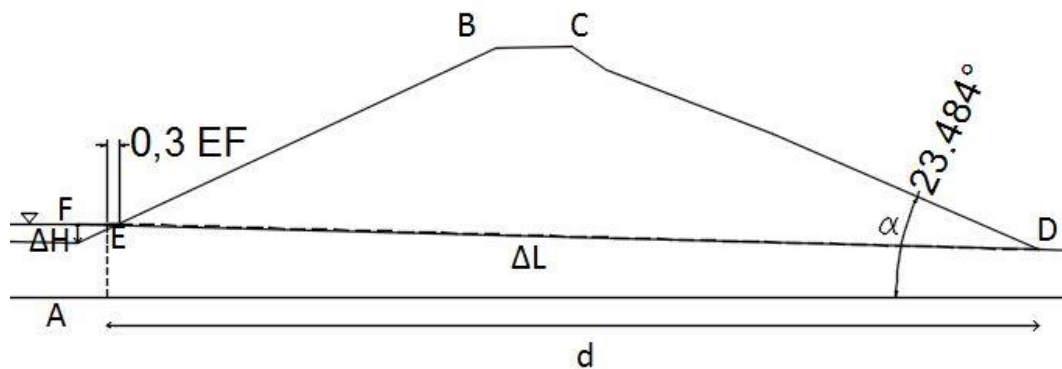
$$i_c = \frac{2,68-1}{1+1,26}$$

$$= 0,7434$$

$$SF = \frac{0,743}{0,328}$$

$$= 2,26$$

5.3.3 Rembesan pada Muka Air Minimum



Gambar 5. 3 Hitungan Rembesan Metode Casagrande pada Kondisi Muka Air Minimum

1. Debit Rembesan

Perhitungan debit rembesan dengan menggunakan metode casagrande pada kondisi muka air minimum dengan panjang bendungan sebesar 730 m, dihitung sebagai berikut.

$$H_{hulu} = 2,541 \text{ m}$$

$$H^2_{Hulu} = 6,456 \text{ m}$$

$$\alpha = 23,48$$

$$\tan \alpha = 0,4343$$

$$\cot^2 \alpha = 5,2992$$

$$\sin \alpha = 0,3984$$

$$\sin^2 \alpha = 0,1587$$

$$k = 1,45E-10 \text{ m/det}$$

$$d = 31,946 \text{ m}$$

$$d^2 = 1047,817 \text{ m}$$

$$a = \sqrt{(d^2 + H^2)} - \sqrt{d^2 - H^2 \times \cot^2 \alpha}$$

$$= \sqrt{(1047,817 + 6,456)} - \sqrt{1047,817 - 6,456 \times 5,2992}$$

$$= 0,632 \text{ m}$$

$$Q_{\text{total}} = k \times a \times \sin^2 \alpha \times \text{Panjang Bendungan}$$

$$= 1,45 \times 10^{-10} \times 0,632 \times 0,1587 \times 730$$

$$= 1,45 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{det}$$

Maka didapatkan hasil debit rembesan total (Q_{total}) pada kondisi muka air banjir didapatkan nilai rembesan sebesar $1,45 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{det}$.

2. Gradien Hidrolik

Perhitungan rembesan berdasarkan gradien hidrolik didapatkan sebagai berikut.

$$i_{\text{exit}} = \frac{2,541}{31,946}$$

$$= 0,079$$

$$i_c = \frac{2,68-1}{1+1,26}$$

$$= 0,743$$

$$SF = \frac{0,743}{0,079}$$

$$= 9,345$$

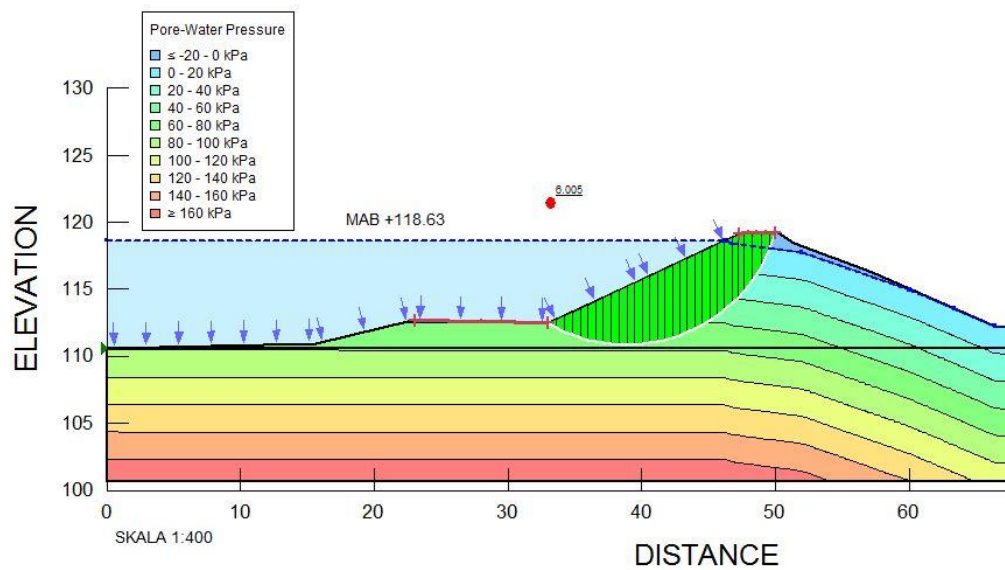
5.4 Perhitungan Stabilitas Dengan Garis Freatik Manual

Perhitungan stabilitas pada tubuh bendungan saradan dengan garis freatik manual dilakukan dengan menggunakan program GeoStudio berupa *SLOPE/W*. Perhitungan stabilitas pada tubuh bendungan saradan dilakukan pada 4 kondisi yaitu kondisi muka air banjir, kondisi muka air normal, kondisi muka air minimum dan surut cepat (*rapid drawdown*). Pada setiap kondisi akan ditambahkan dengan koefisien beban gempa OBE dan MDE.

5.4.1 Stabilitas Pada Kondisi Muka Air Banjir dengan Garis Freatik

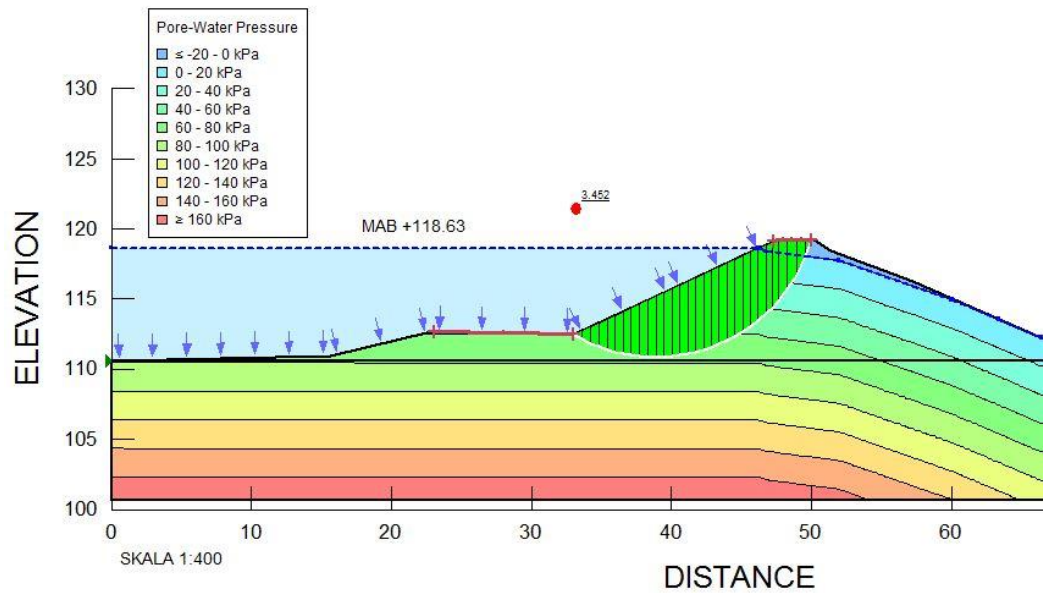
Manual

Hasil perhitungan stabilitas lereng pada kondisi muka air banjir dengan garis freatik manual dapat dilihat pada Gambar 5.4 sampai dengan Gambar 5.9.



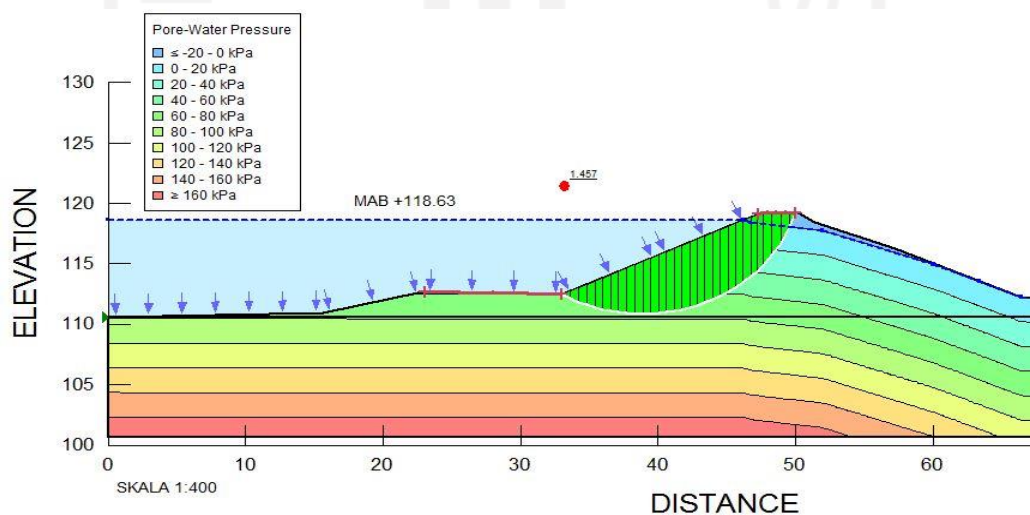
Gambar 5. 4 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.4. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* tanpa beban gempa sebesar 6,005 dan radius sebesar 11,565.



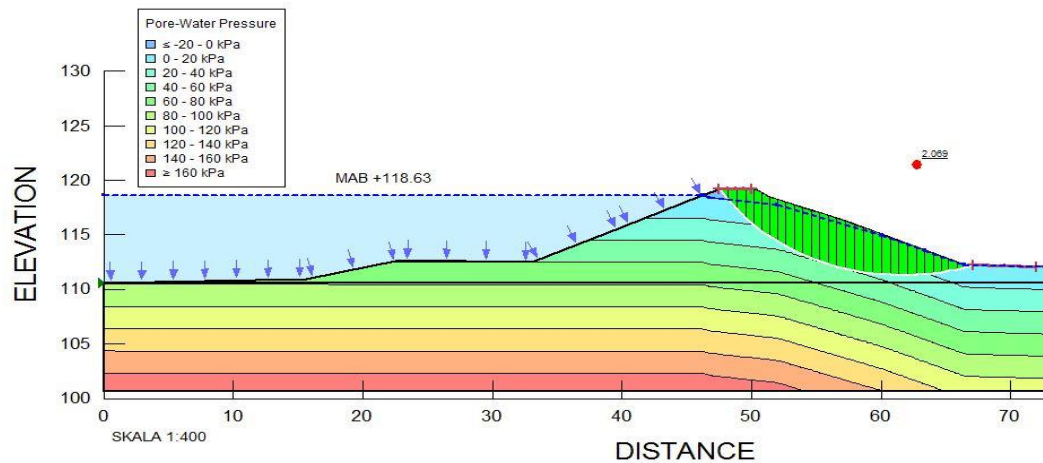
Gambar 5. 5 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir

Dari hasil analisis permodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.5. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* dengan beban gempa OBE sebesar 3,452 dan radius sebesar 11,565.



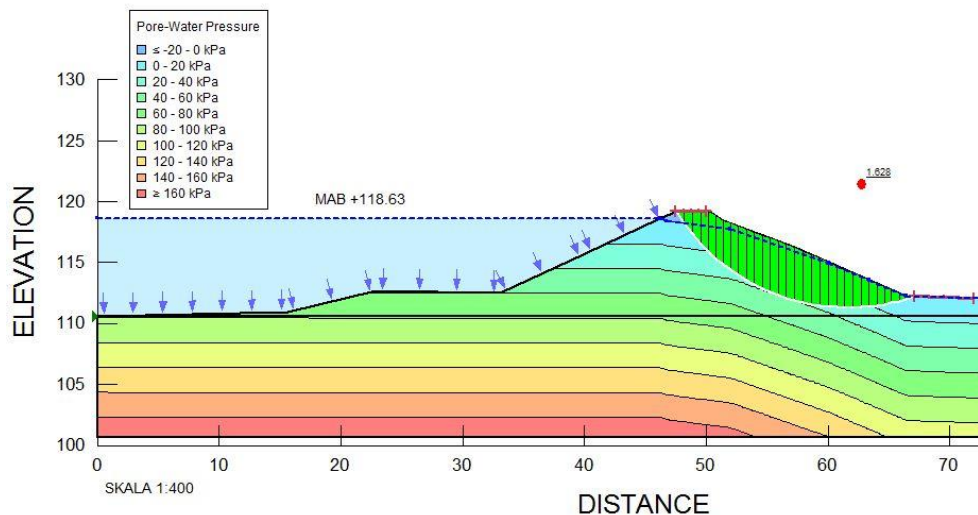
Gambar 5. 6 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.6. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* dengan beban gempa MDE sebesar 1,457 dan radius sebesar 11,565.



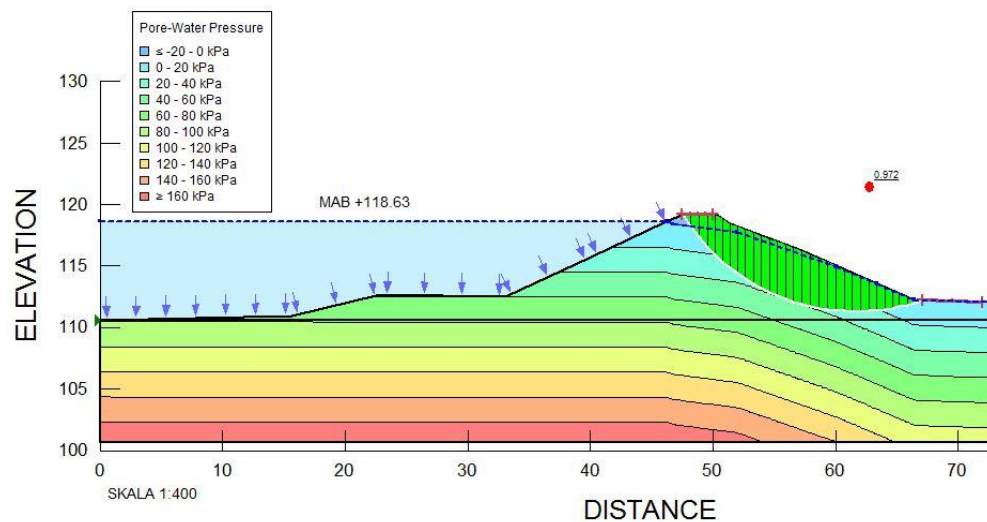
Gambar 5. 7 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.7. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* tanpa beban gempa sebesar 2,069 dan radius sebesar 16,565.



Gambar 5. 8 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.8. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* dengan beban gempa OBE sebesar 1,628 dan radius sebesar 16,565.



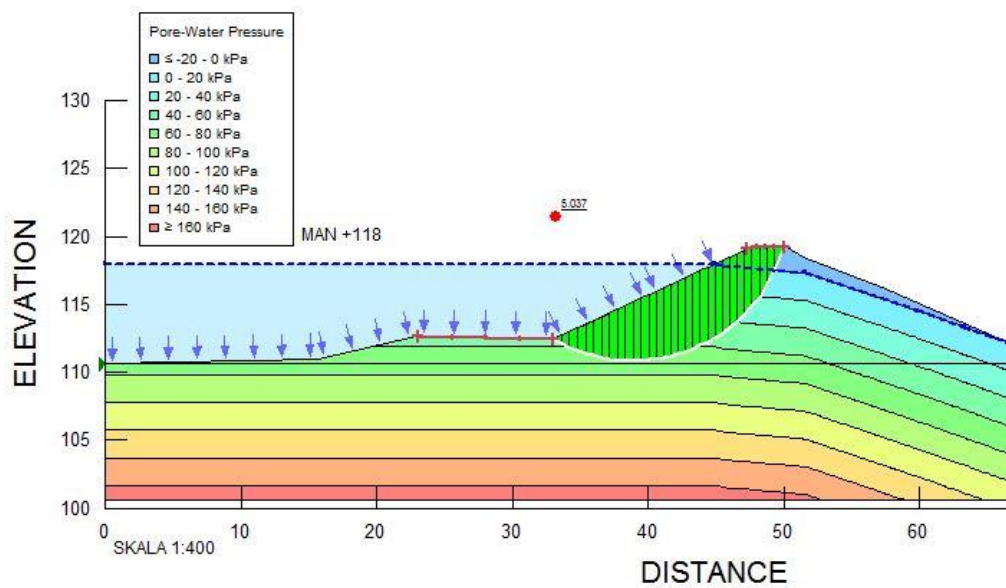
Gambar 5. 9 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.9. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* dengan beban gempa MDE sebesar 0,972 dan radius sebesar 16,565.

5.4.2 Stabilitas Pada Kondisi Muka Air Normal dengan Garis Freatik

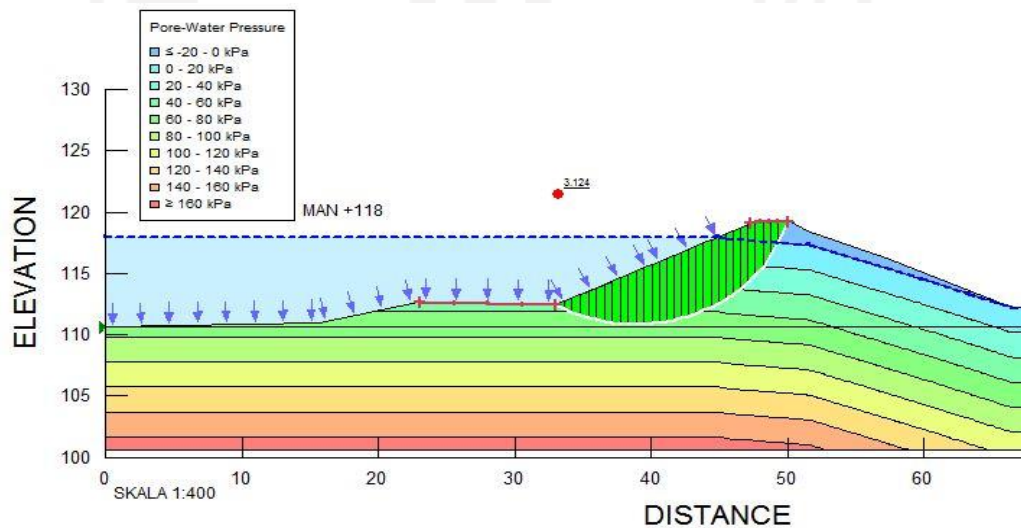
Manual

Hasil perhitungan stabilitas lereng pada kondisi muka air normal dengan garis freatik manual dapat dilihat pada Gambar 5.10 sampai dengan Gambar 5.15.



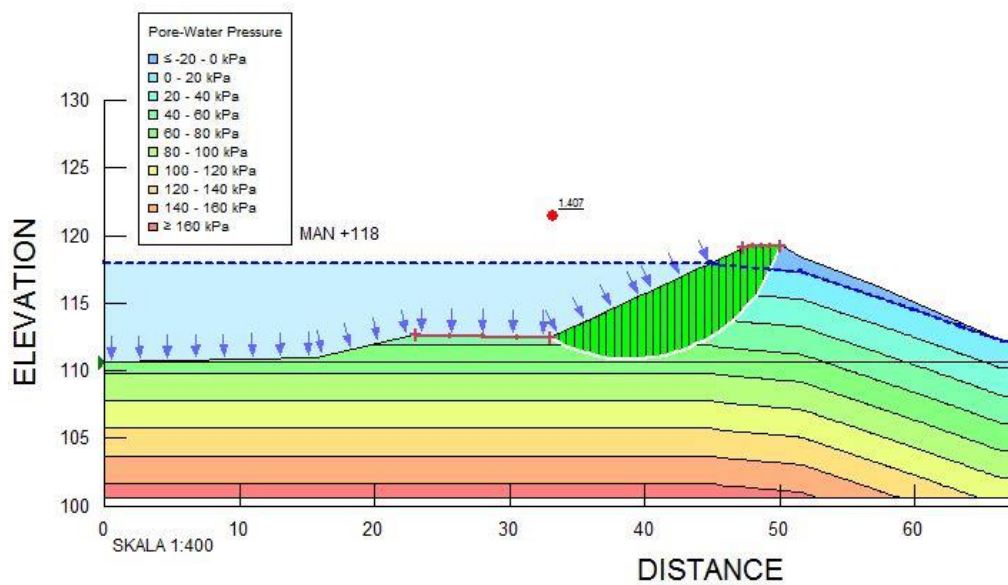
Gambar 5. 10 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.10. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* tanpa beban gempa sebesar 5,037 dan radius sebesar 11,565.



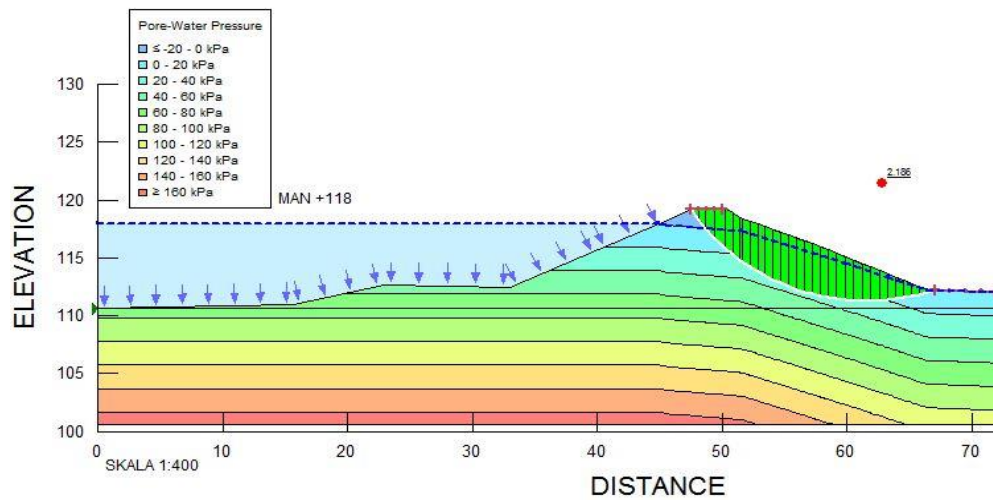
Gambar 5. 11 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.11. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* dengan beban gempa OBE sebesar 3,124 dan radius sebesar 11,565.



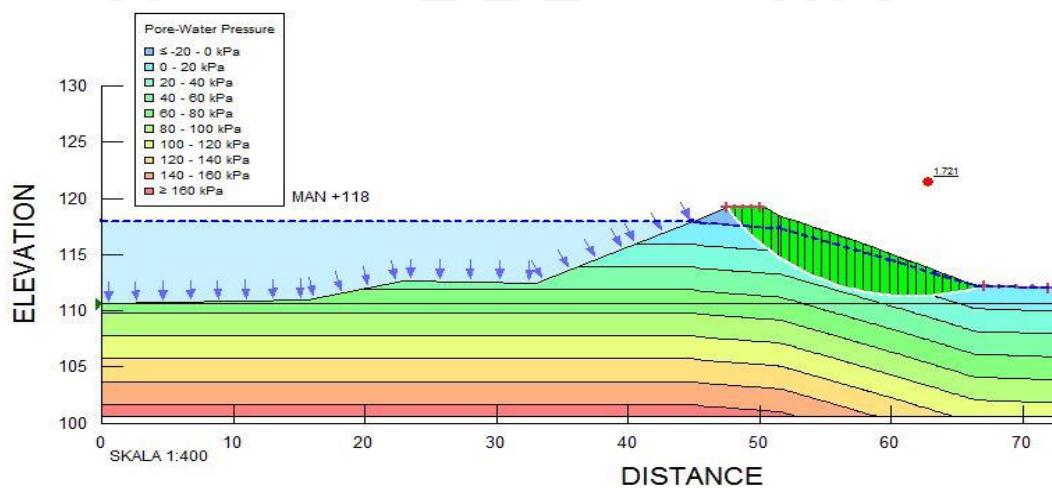
Gambar 5. 12 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.12. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* dengan beban gempa MDE sebesar 1,407 dan radius sebesar 11,565.



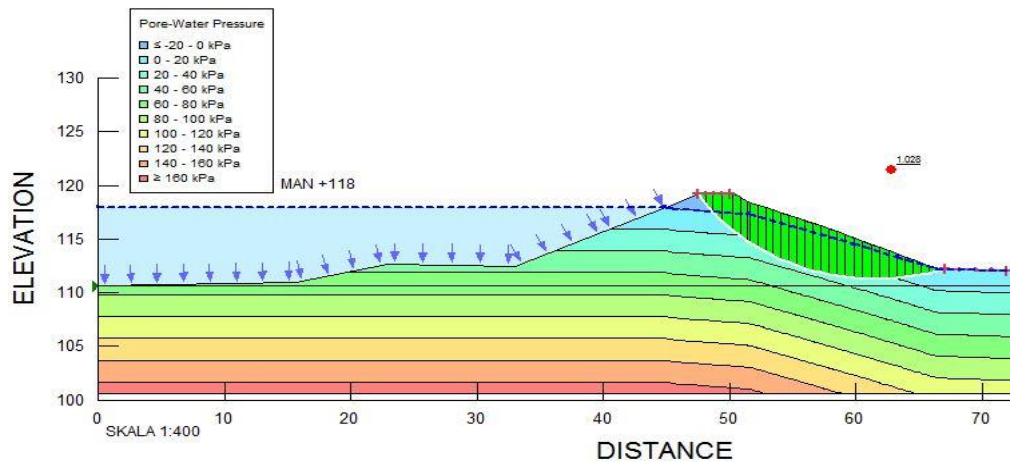
Gambar 5. 13 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.13. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* tanpa beban gempa sebesar 2,186 dan radius sebesar 16,565.



Gambar 5. 14 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.14. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* dengan beban gempa OBE sebesar 1,721 dan radius sebesar 16,565.

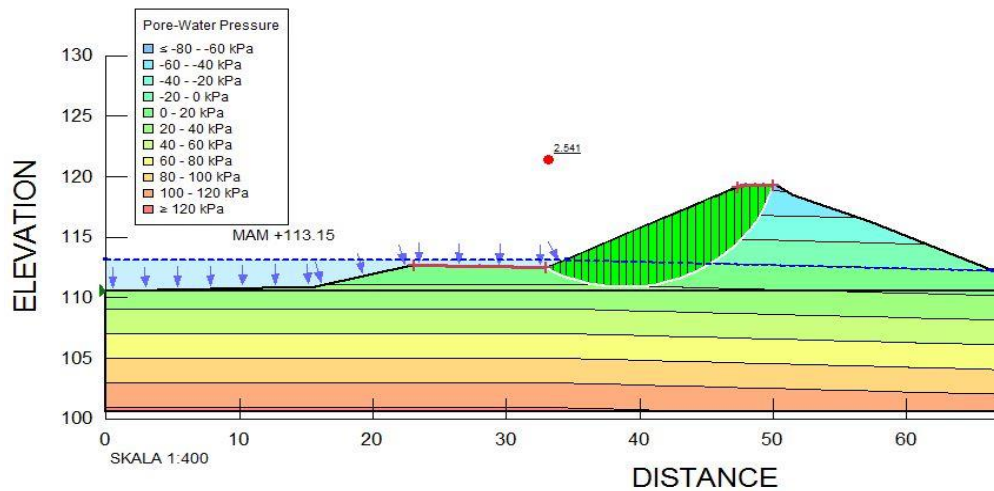


Gambar 5. 15 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.15. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* dengan beban gempa MDE sebesar 1,028 dan radius sebesar 16,565.

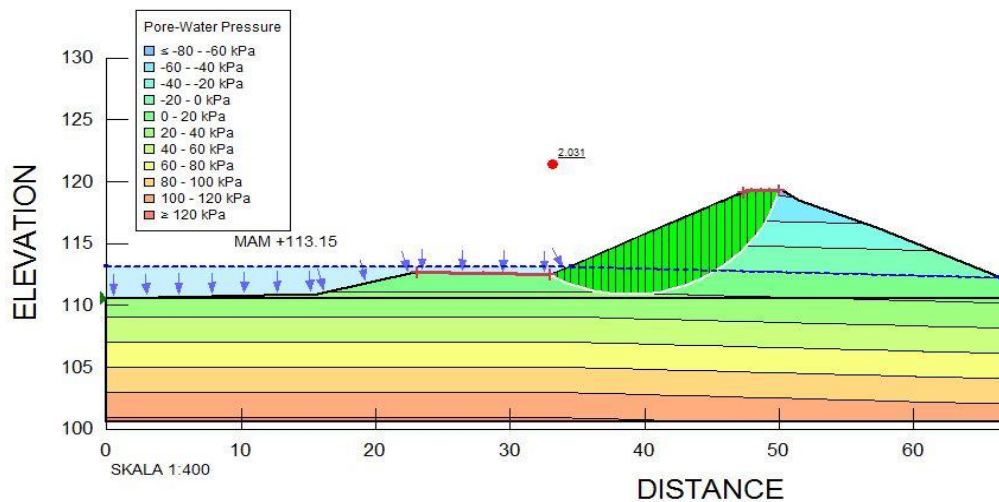
5.4.3 Stabilitas Pada Kondisi Muka Air Minimum dengan Garis Freatik Manual

Hasil perhitungan stabilitas lereng pada kondisi muka air minimum dengan garis freatik manual dapat dilihat pada Gambar 5.16 sampai dengan Gambar 5.21.



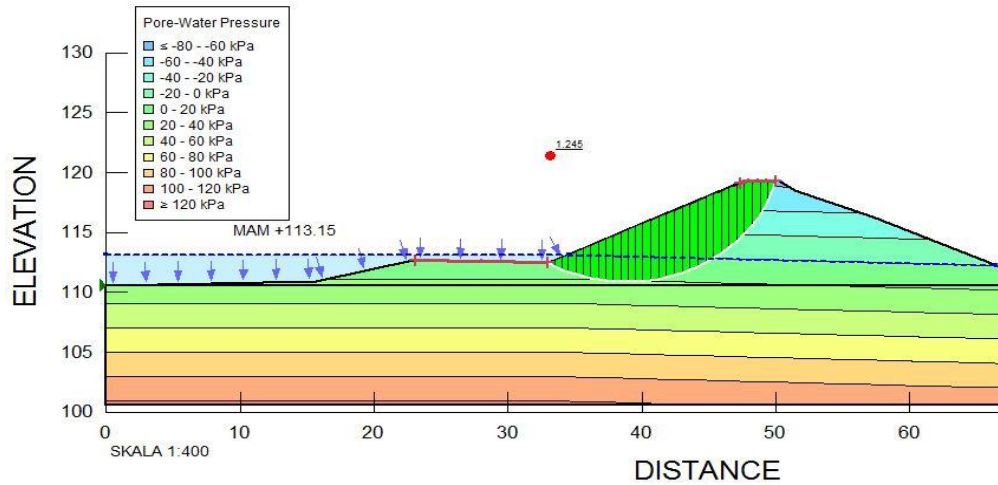
Gambar 5. 16 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.16. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* tanpa beban gempa sebesar 2,541 dan radius sebesar 11,565.



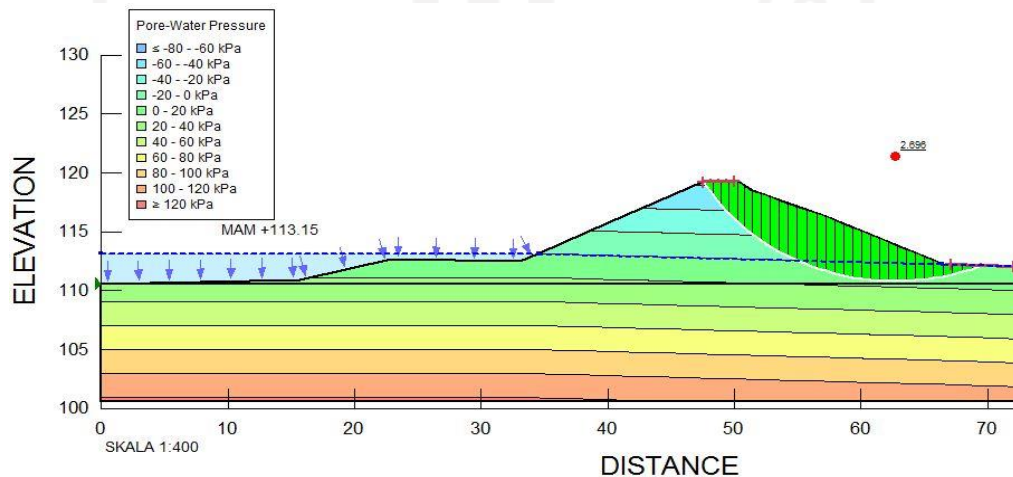
Gambar 5. 17 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.17. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* dengan beban gempa OBE sebesar 2,031 dan radius sebesar 11,565.



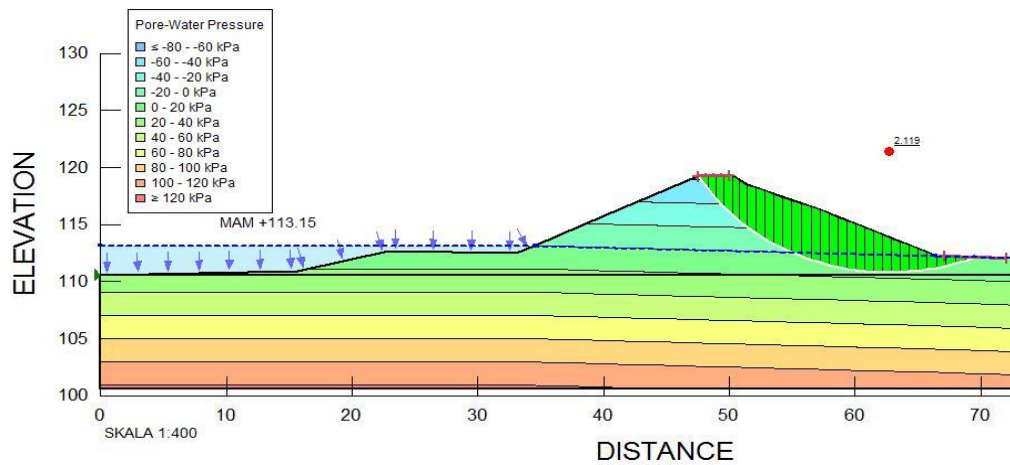
Gambar 5. 18 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.18. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* dengan beban gempa MDE sebesar 1,245 dan radius sebesar 11,565.



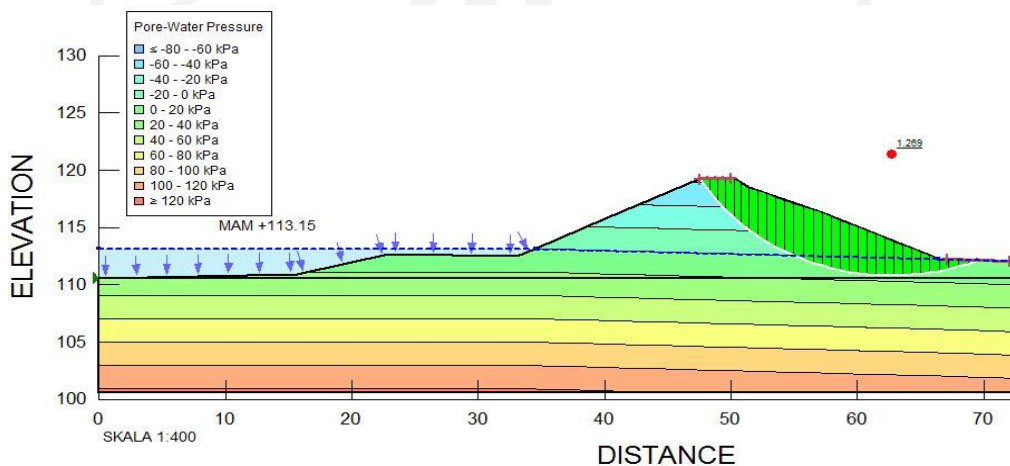
Gambar 5. 19 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.19. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* tanpa beban gempa sebesar 2,696 dan radius sebesar 17,969.



Gambar 5. 20 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.20. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* dengan beban gempa OBE sebesar 2,119 dan radius sebesar 17,969.

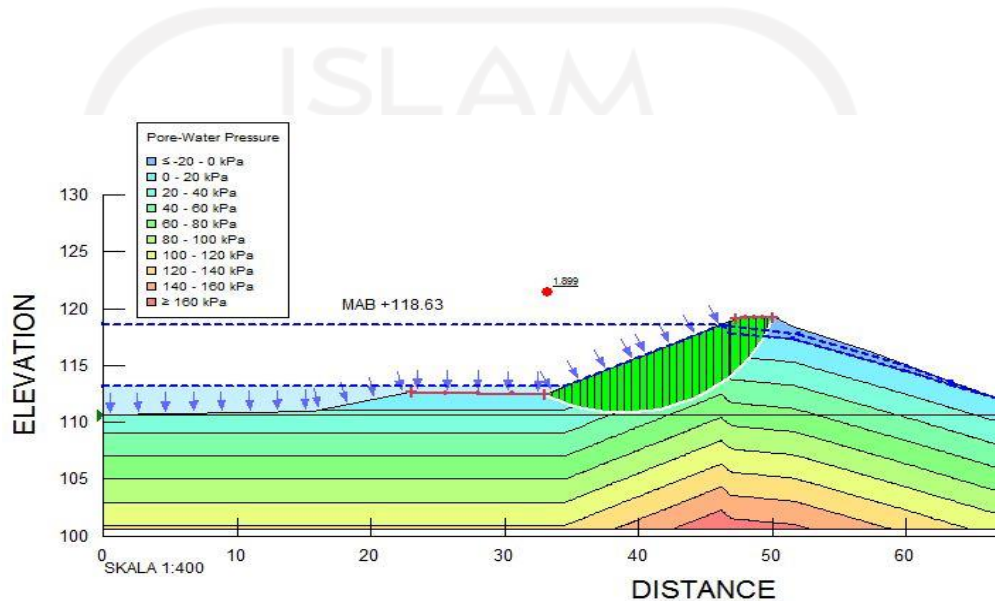


Gambar 5. 21 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.21. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* dengan beban gempa MDE sebesar 1,269 dan radius sebesar 17,969.

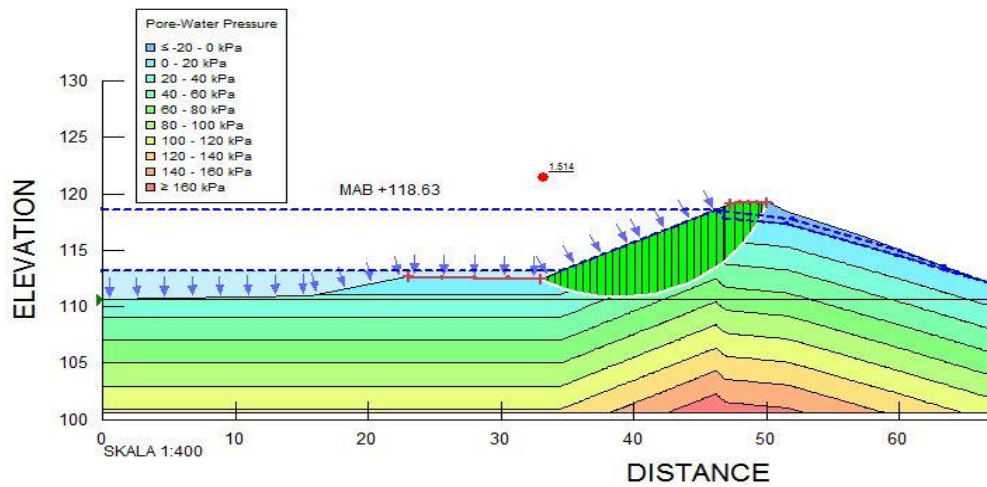
5.4.4 Stabilitas Pada Kondisi Surut Cepat (*Rapid Drawdown*) dengan Garis Freatik Manual

Hasil perhitungan stabilitas lereng pada kondisi surut cepat (*rapid drawdown*) dengan garis freatik manual dapat dilihat pada Gambar 5.22 sampai dengan Gambar 5.27.



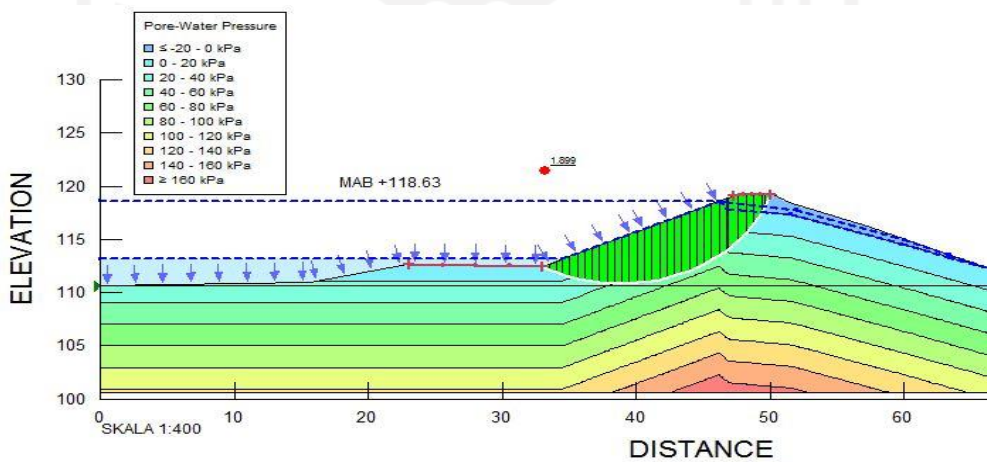
Gambar 5. 22 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.22. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* tanpa beban gempa sebesar 1,899 dan radius sebesar 11,565.



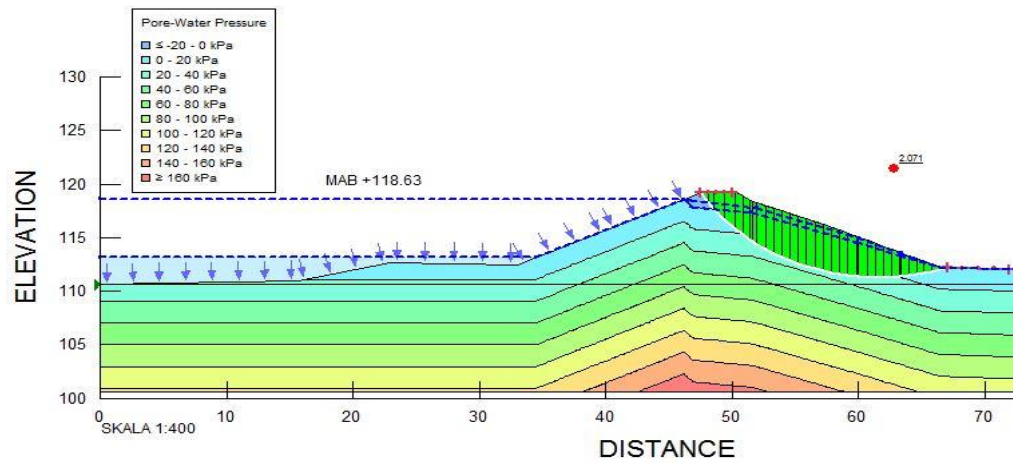
Gambar 5. 23 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.23. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* dengan beban gempa OBE sebesar 1,514 dan radius sebesar 11,565.



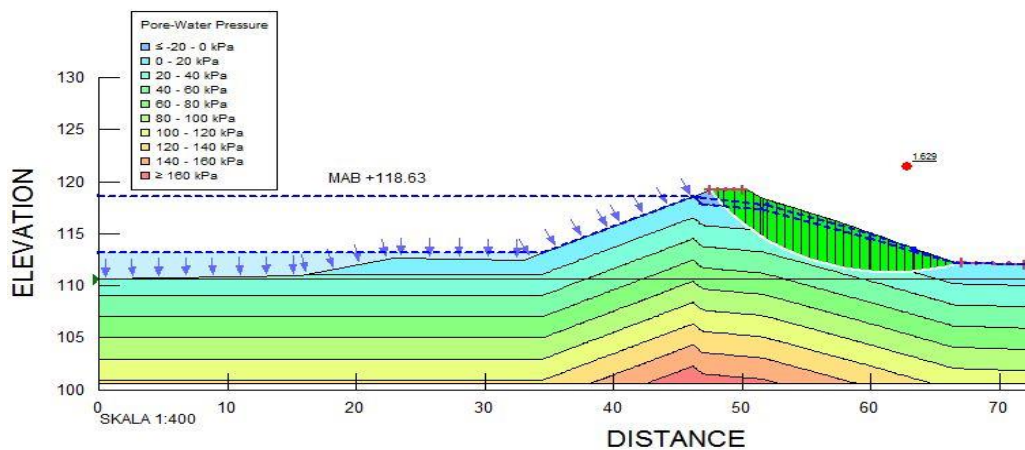
Gambar 5. 24 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.24. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* dengan beban gempa MDE sebesar 0,973 dan radius sebesar 11,565.



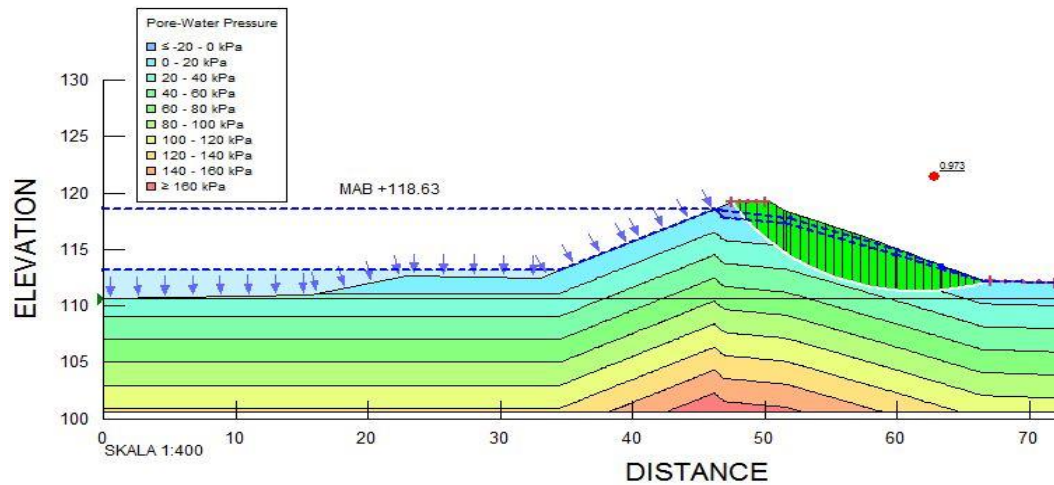
Gambar 5. 25 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.25. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* tanpa beban gempa sebesar 2,071 dan radius sebesar 16,565.



Gambar 5. 26 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.26. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* dengan beban gempa OBE sebesar 1,629 dan radius sebesar 16,565.



Gambar 5. 27 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.27. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* dengan beban gempa MDE sebesar 0,924 dan radius sebesar 16,565.

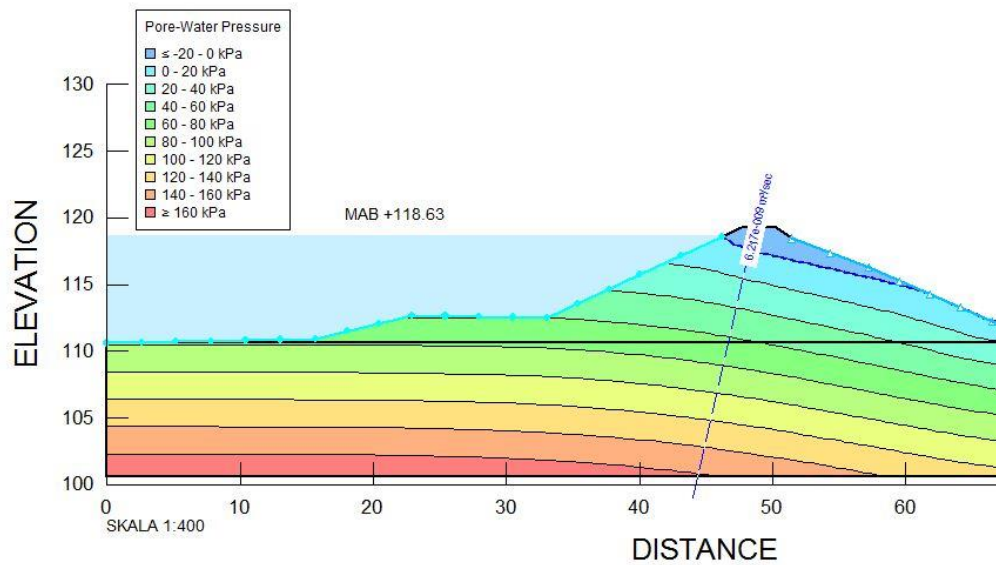
5.5 Perhitungan Rembesan dengan SEEP/W

Perhitungan rembesan pada tubuh Bendungan Saradan dilakukan dengan menggunakan program GeoStudio berupa SEEP/W. Rembesan pada tubuh bendungan dilakukan dengan tinjauan yaitu debit rembesan.

5.5.1 Debit Rembesan

1. Muka Air Banjir

Perhitungan rembesan pada tubuh Bendungan Saradan dengan tinjauan debit rembesan pada kondisi muka air banjir dapat dilihat pada Gambar 5.28 berikut.



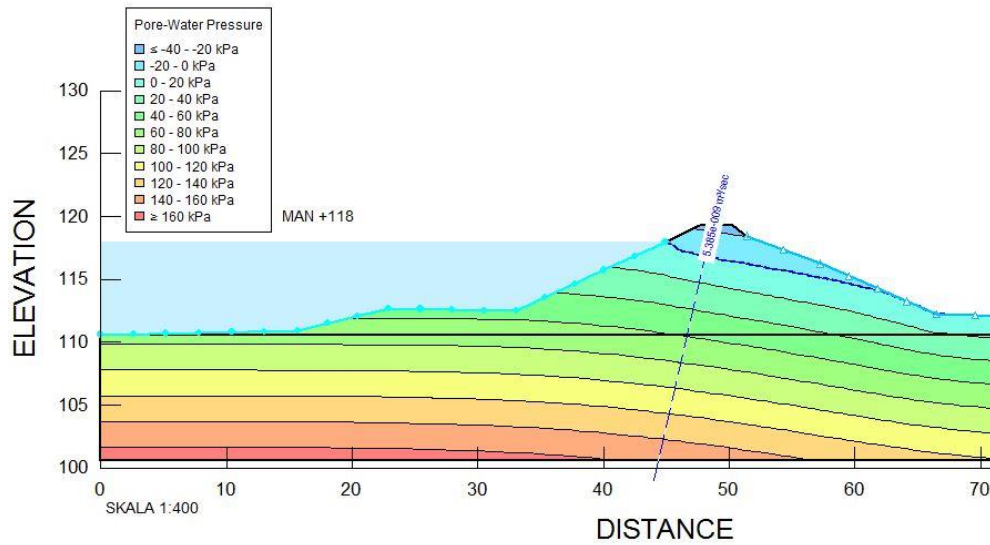
Gambar 5. 28 Hasil Perhitungan Rembesan Dengan SEEP/W Dengan Kondisi Muka Air Banjir

Berdasarkan data teknis Bendungan Saradan memiliki panjang puncak 730 m sehingga total rembesan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{total}} &= 6,217 \times 10^{-9} \times 730 \\
 &= 4,538 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{dt}
 \end{aligned}$$

2. Muka Air Normal

Perhitungan rembesan pada tubuh Bendungan Saradan dengan tinjauan debit rembesan pada kondisi muka air normal dapat dilihat pada Gambar 5.29 berikut.



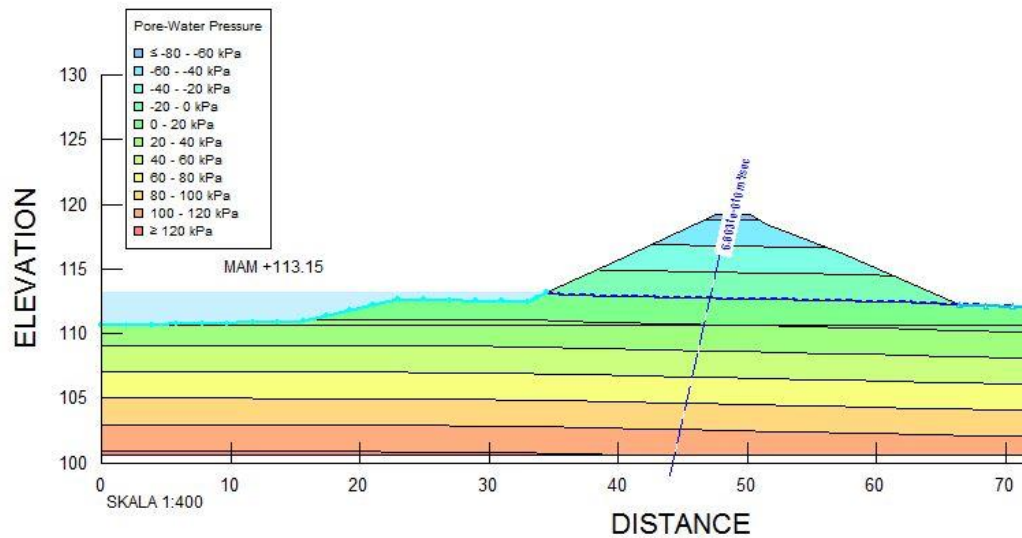
Gambar 5. 29 Hasil Perhitungan Rembesan Dengan SEEP/W Dengan Kondisi Muka Air Normal

Berdasarkan data teknis Bendungan Saradan memiliki panjang puncak 730 m sehingga total rembesan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{total}} &= 5,385 \times 10^{-9} \times 730 \\
 &= 3,931 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{dt}
 \end{aligned}$$

3. Muka Air Mnimum

Perhitungan rembesan pada tubuh Bendungan Saradan dengan tinjauan debit rembesan pada kondisi muka air normal dapat dilihat pada Gambar 5.30 berikut.



Gambar 5. 30 Hasil Perhitungan Rembesan Dengan SEEP/W Dengan Kondisi Muka Air Minimum

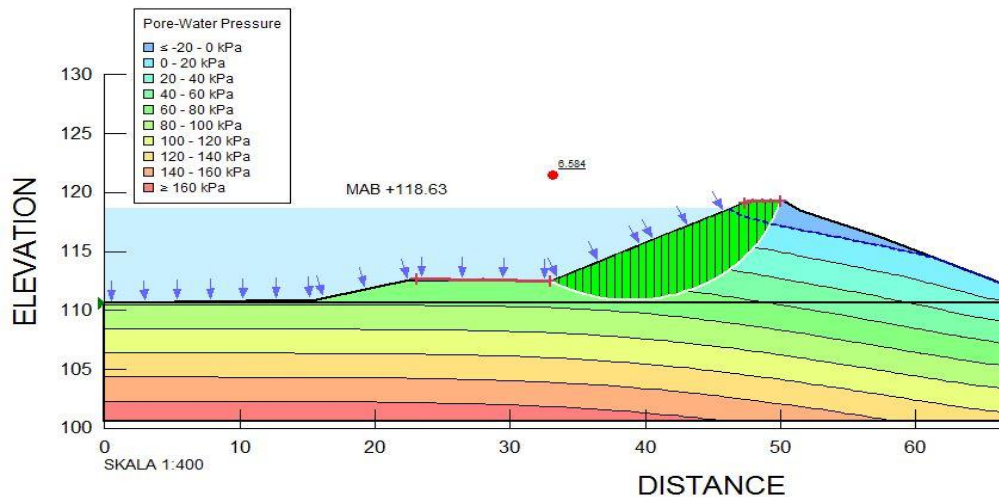
Berdasarkan data teknis Bendungan Saradan memiliki panjang puncak 730 m sehingga total rembesan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{total}} &= 6,803 \times 10^{-10} \times 730 \\
 &= 4,966 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{dt}
 \end{aligned}$$

5.6 Perhitungan Stabilitas Dengan Garis Freatik Hasil SEEP/W

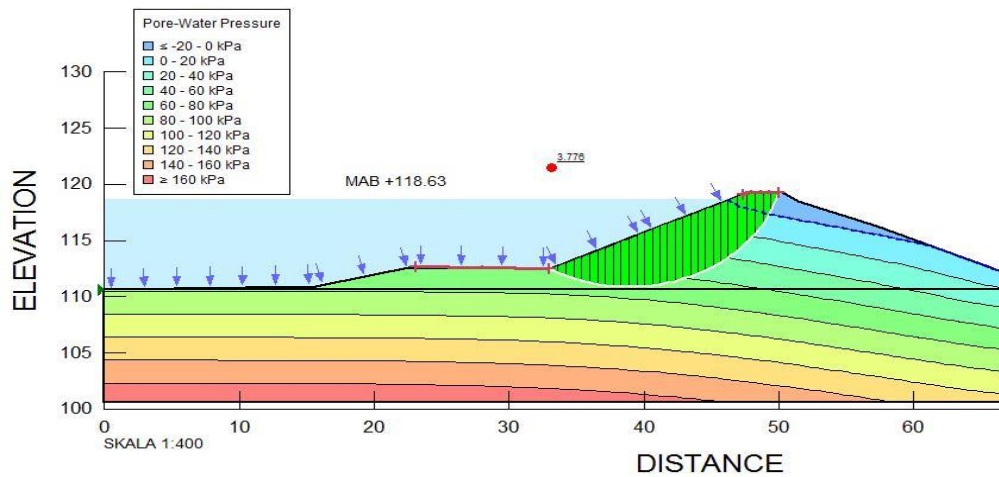
5.6.1 Stabilitas Lereng Pada Kondisi Muka Air Banjir dengan Garis Freatik Hasil SEEP/W

Perhitungan stabilitas pada Bendungan Saradan dengan kondisi muka air banjir dapat dilihat pada Gambar 5.31 sampai dengan Gambar 5.36 berikut.



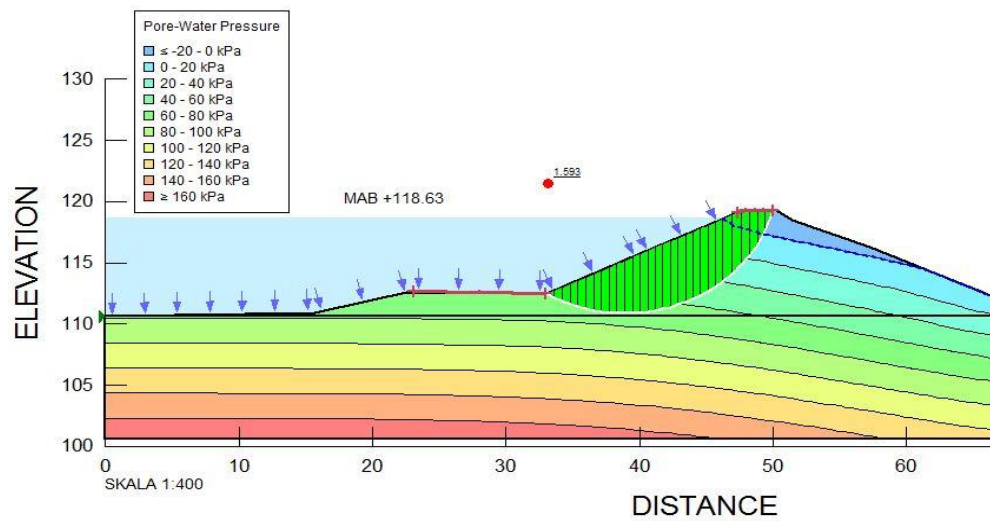
Gambar 5. 31 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Tanpa Gempa dengan SEEP/W pada Kondisi Muka Air Banjir

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.31. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* tanpa beban gempa sebesar 6,684 dan radius sebesar 11,565.



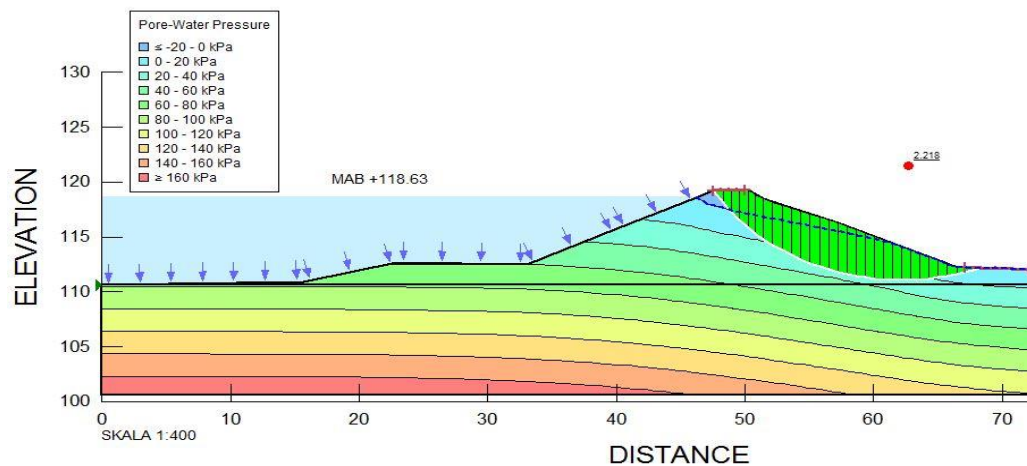
Gambar 5. 32 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.32. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* dengan beban gempa OBE sebesar 3,776 dan radius sebesar 11,565.



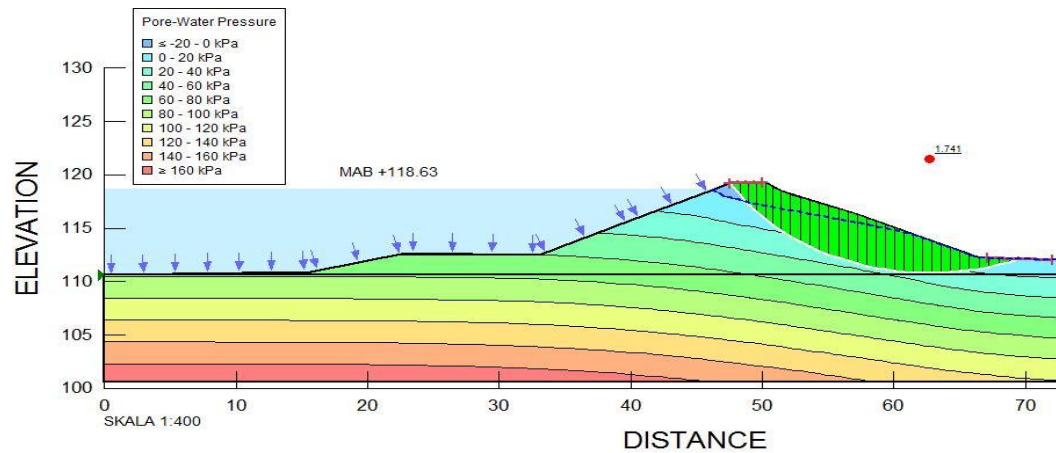
Gambar 5. 33 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.33. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* dengan beban gempa MDE sebesar 1,593 dan radius sebesar 11,565.



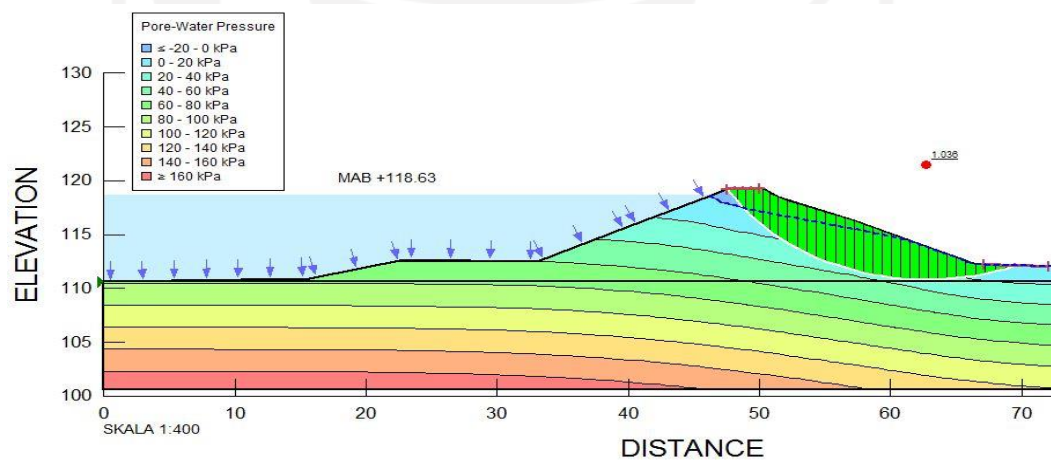
Gambar 5. 34 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.34. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* tanpa beban gempa sebesar 2,218.



Gambar 5. 35 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.35. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* dengan beban gempa OBE sebesar 1,741 dan radius sebesar 17,969.

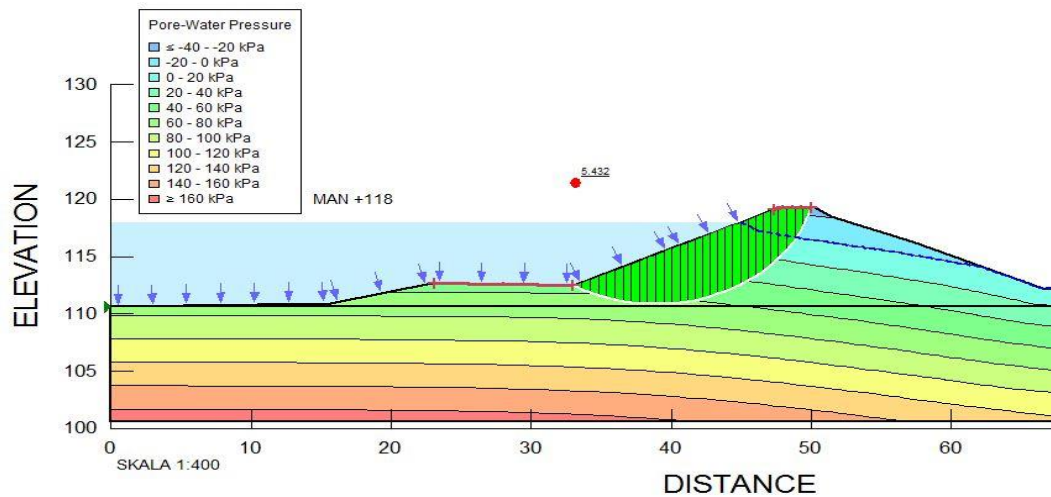


Gambar 5. 36 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Banjir

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.36. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* dengan beban gempa MDE sebesar 1,036 dan radius sebesar 17,969.

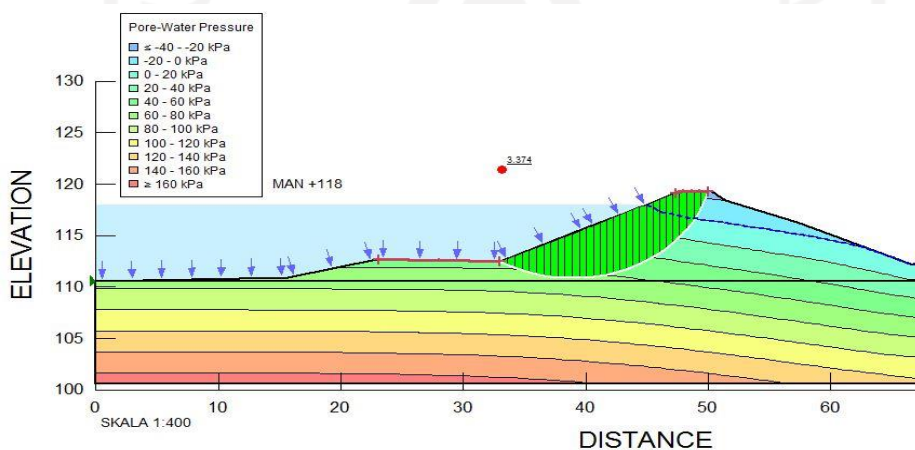
5.6.2 Stabilitas Lereng Pada Kondisi Muka Air Normal dengan Garis Freatik Hasil SEEP/W

Perhitungan stabilitas pada bendungan saradan dengan kondisi muka air normal dapat dilihat pada Gambar 5.37 sampai dengan Gambar 5.42 berikut.



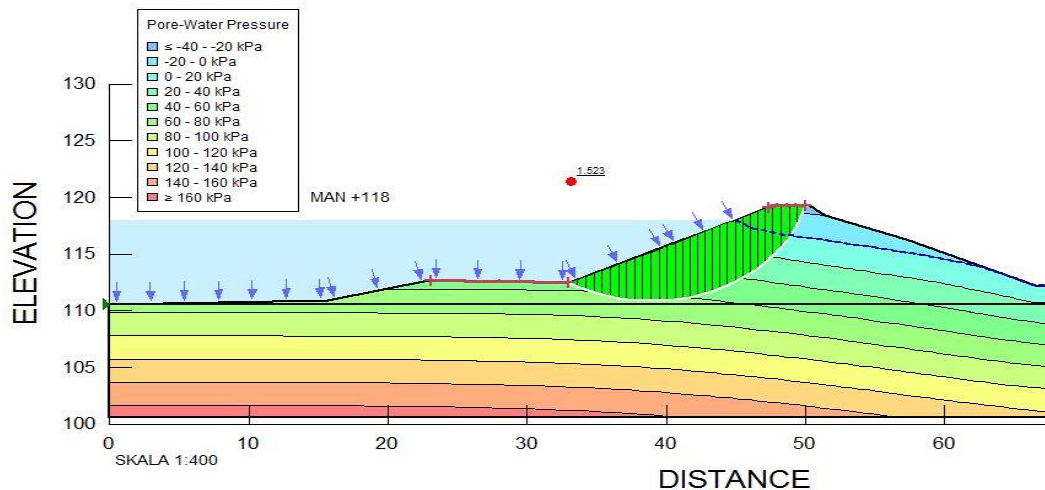
Gambar 5. 37 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.37. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* tanpa beban gempa sebesar 5,432 dan radius sebesar 11,565.



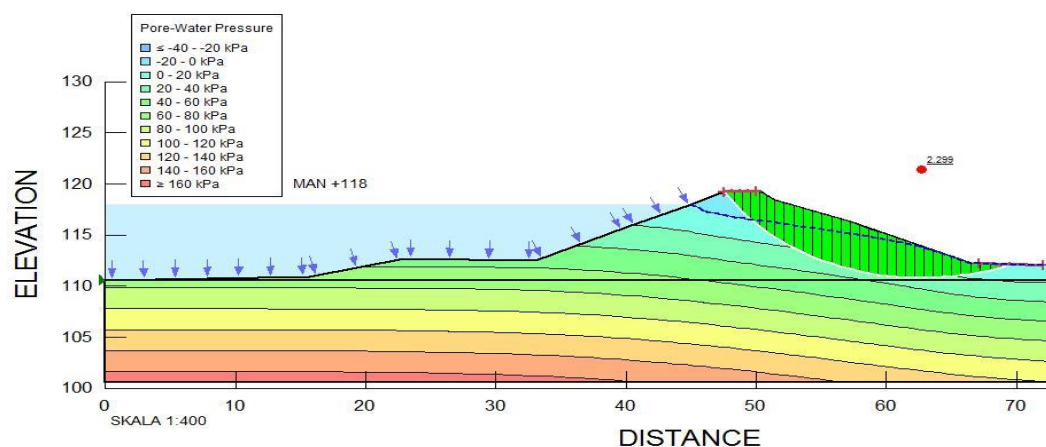
Gambar 5. 38 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.38. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* dengan beban gempa OBE sebesar 3,374 dan radius sebesar 11,565.



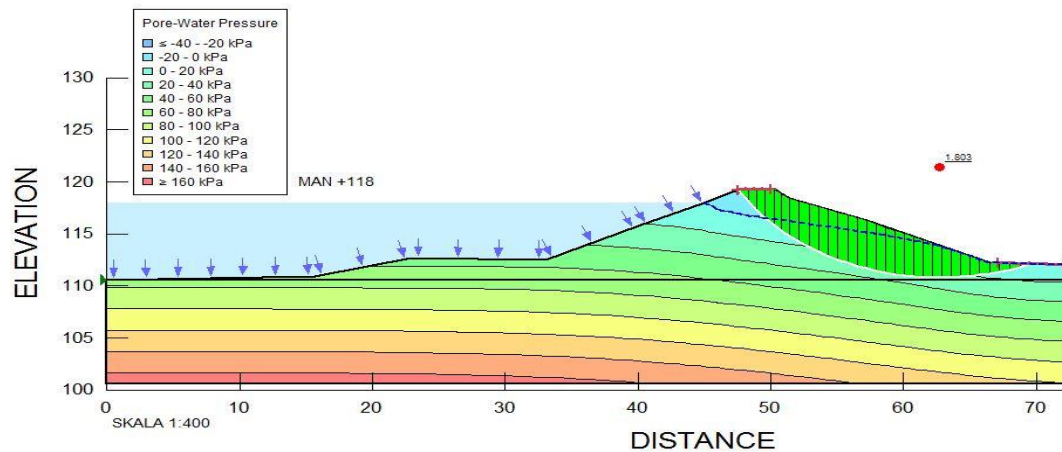
Gambar 5. 39 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.39. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* dengan beban gempa MDE sebesar 1,523 dan radius sebesar 11,565.



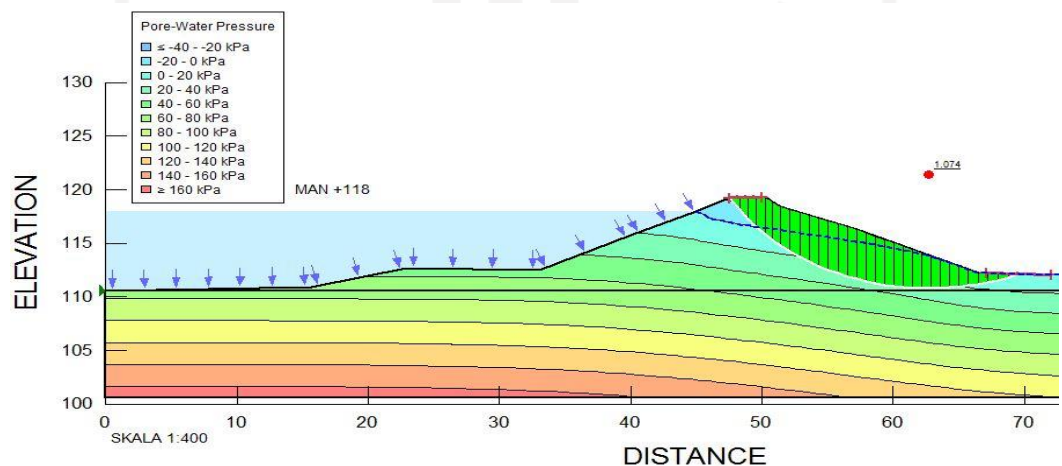
Gambar 5. 40 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.40. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* tanpa beban gempa sebesar 2,299 dan radius sebesar 17,969.



Gambar 5. 41 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.41. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* dengan beban gempa OBE sebesar 1,803 dan radius sebesar 17,969.



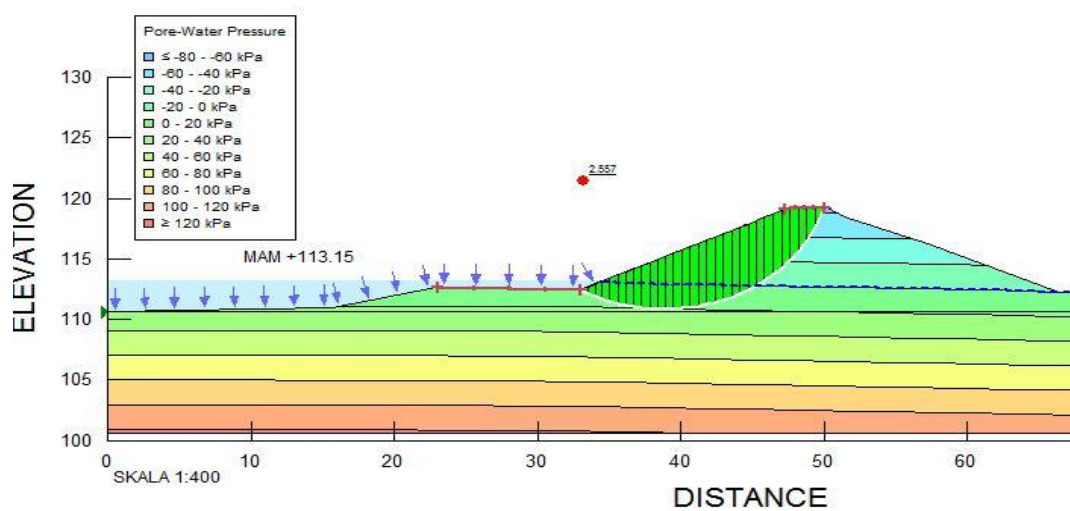
Gambar 5. 42 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Normal

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.42. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* dengan beban gempa MDE sebesar 1,074 dan radius sebesar 17,969.

5.6.3 Stabilitas Lereng Pada Kondisi Muka Air Minimum dengan Garis

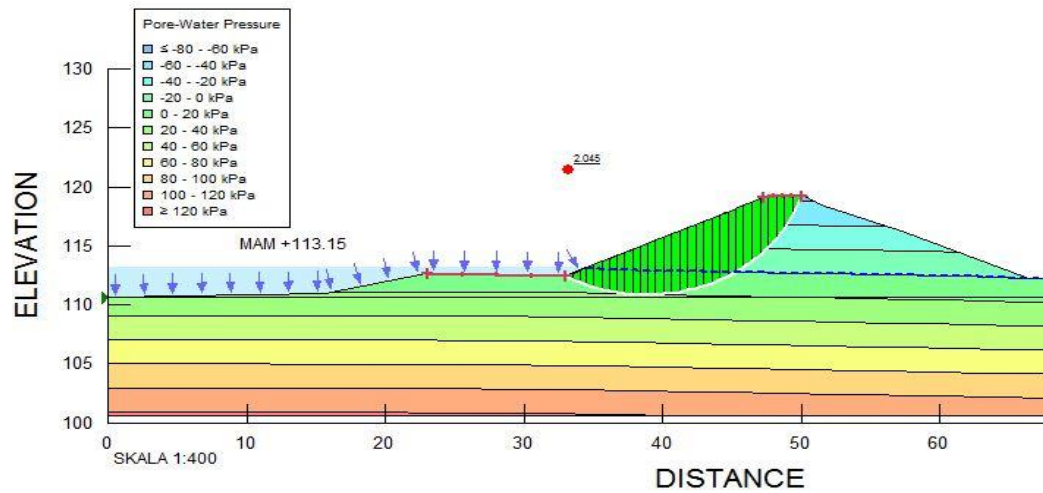
Freatik Hasil SEEP/W

Perhitungan stabilitas pada bendungan saradan dengan kondisi muka air Minimum dapat dilihat pada Gambar 5.43 sampai dengan Gambar 5.48 berikut.



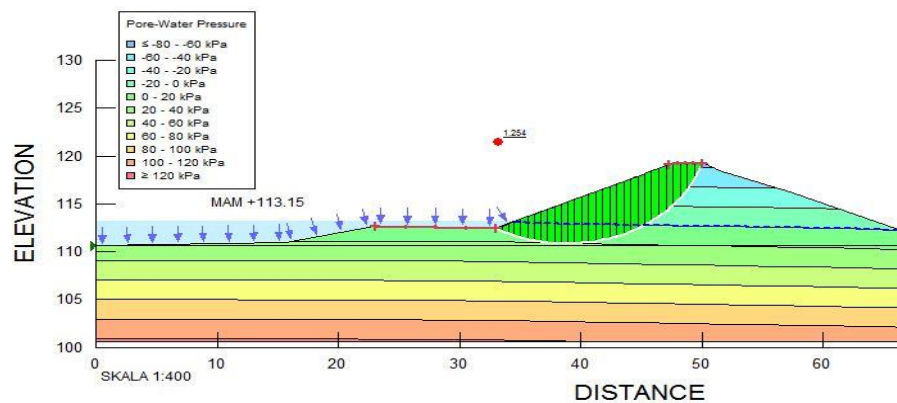
Gambar 5. 43 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.43. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* tanpa beban gempa sebesar 2,557 dan radius sebesar 11,565.



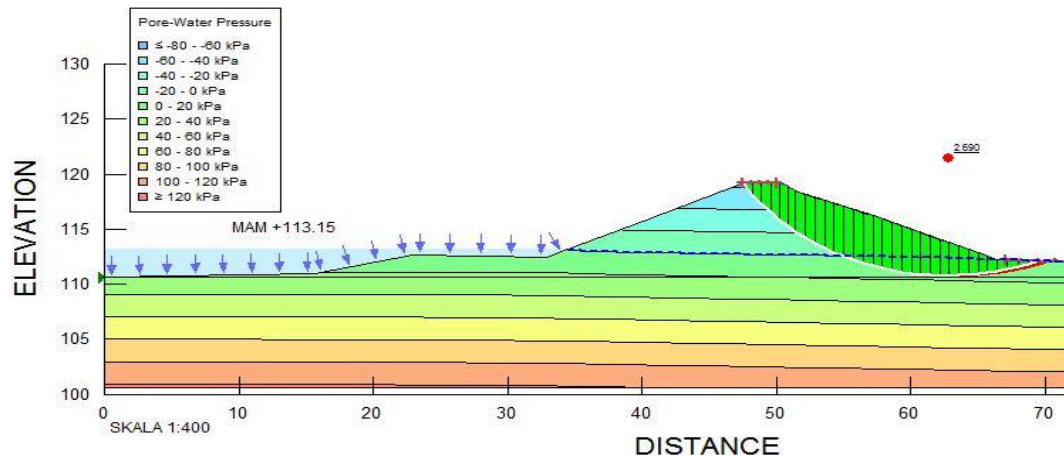
Gambar 5. 44 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.44. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* dengan beban gempa OBE sebesar 2,045 dan radius sebesar 11,565.



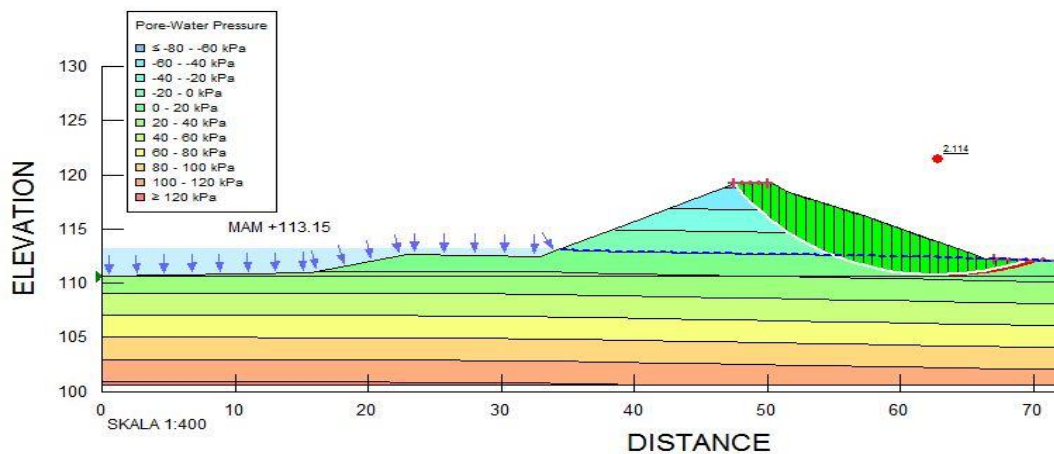
Gambar 5. 45 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.45. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* dengan beban gempa MDE sebesar 1,254 dan radius sebesar 11,565.



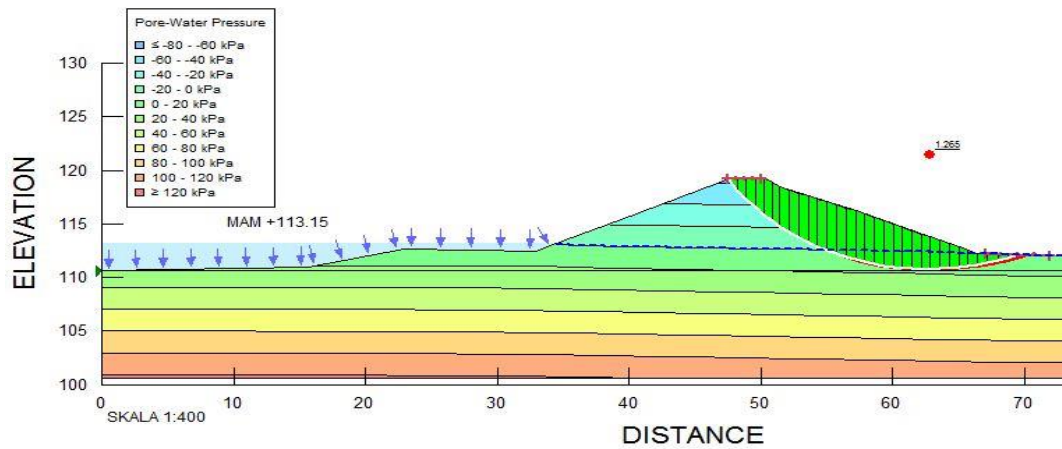
Gambar 5. 46 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.46. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* tanpa beban gempa sebesar 2,690 dan radius sebesar 17,969.



Gambar 5. 47 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.47. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* dengan beban gempa OBE sebesar 2,114 dan radius sebesar 17,969.

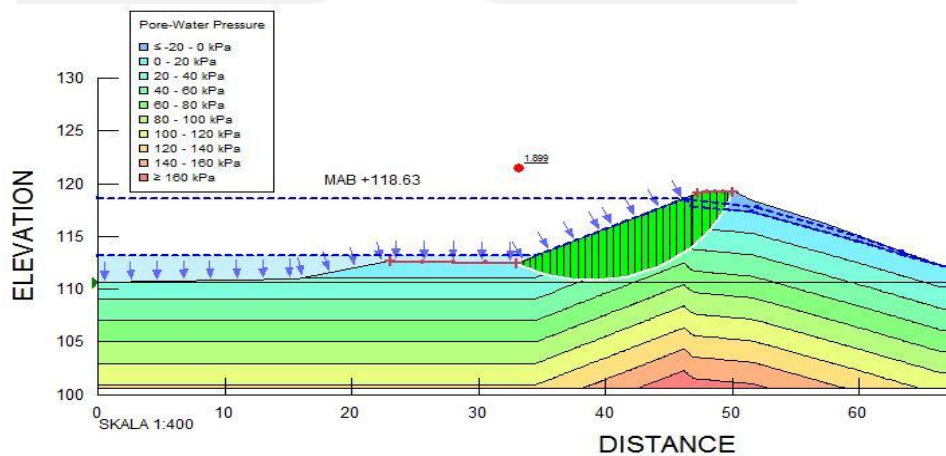


Gambar 5. 48 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Muka Air Minimum

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.48. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* dengan beban gempa MDE sebesar 1,265 dan radius sebesar 17,969.

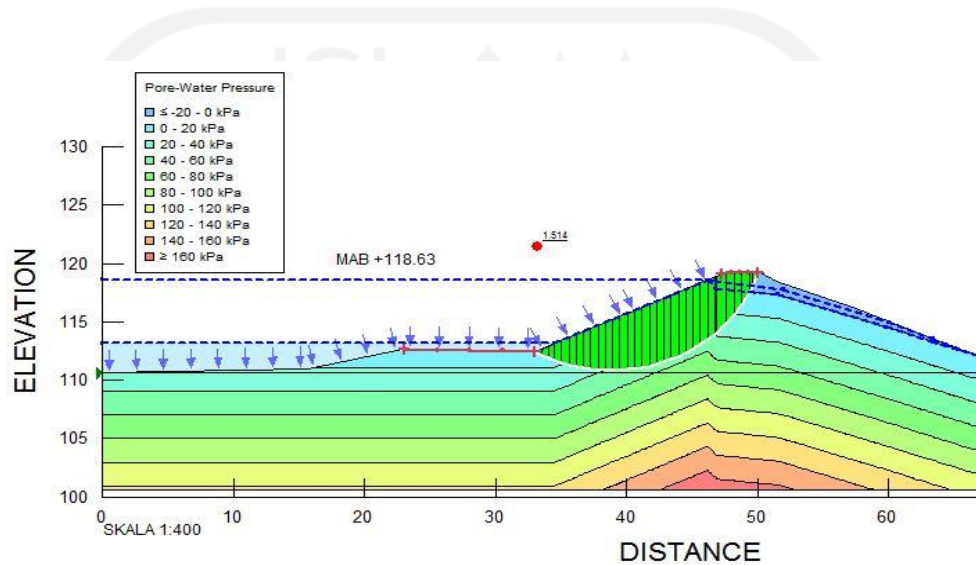
5.6.4 Stabilitas Lereng Pada Kondisi Surut Cepat (Rapid Drawdown) dengan Garis Freatik Hasil SEEP/W

Perhitungan stabilitas pada bendungan Saradan dengan kondisi muka air normal dapat dilihat pada Gambar 5.49 sampai dengan Gambar 5.54 berikut.



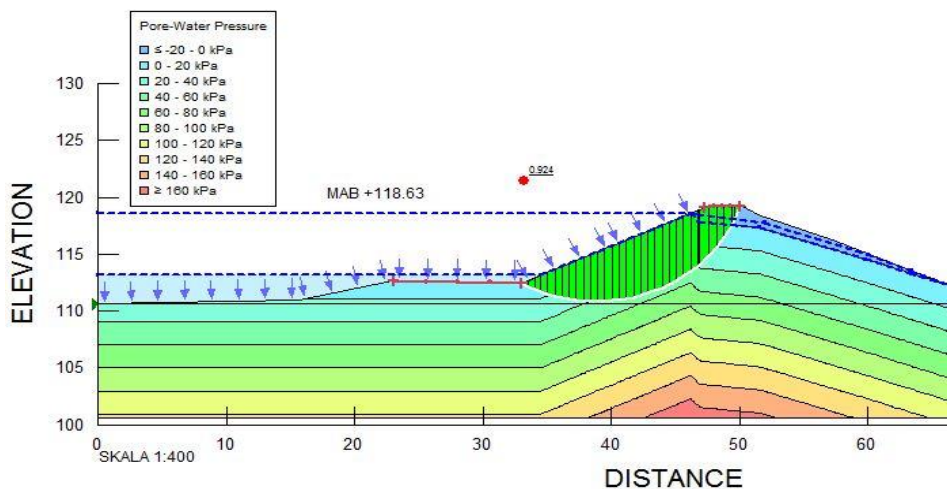
Gambar 5. 49 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Surut Cepat

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.49. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* tanpa beban gempa sebesar 1,887 dan radius sebesar 11,565.



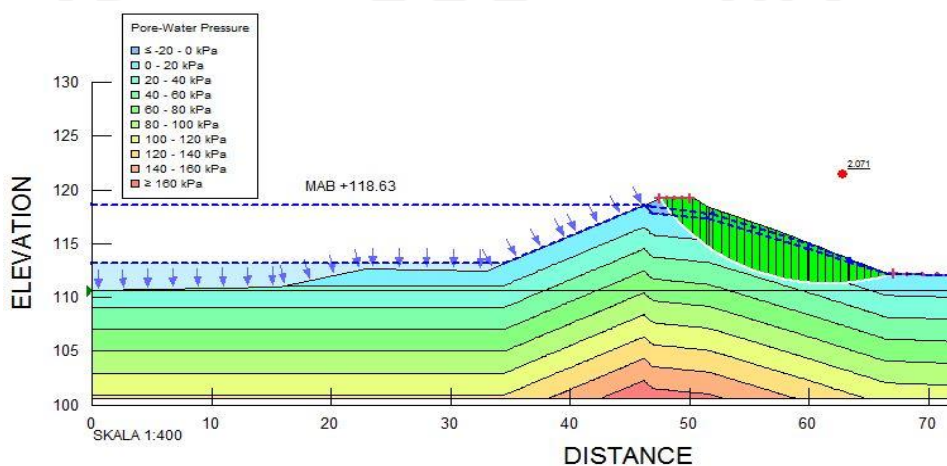
Gambar 5. 50 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.50. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* dengan beban gempa OBE sebesar 1,505 dan radius sebesar 11,565.



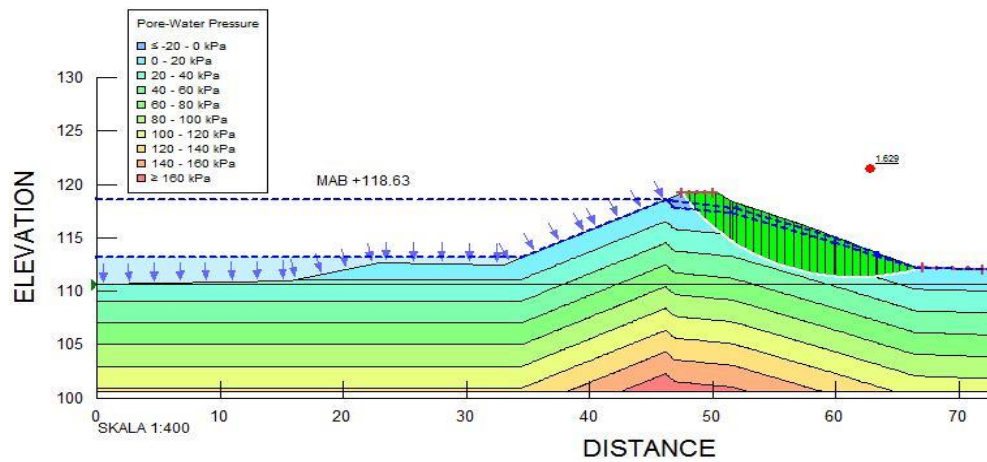
Gambar 5. 51 Hasil Perhitungan Stabilitas Upstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.51. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *upstream* dengan beban gempa MDE sebesar 0,919 dan radius sebesar 11,565.



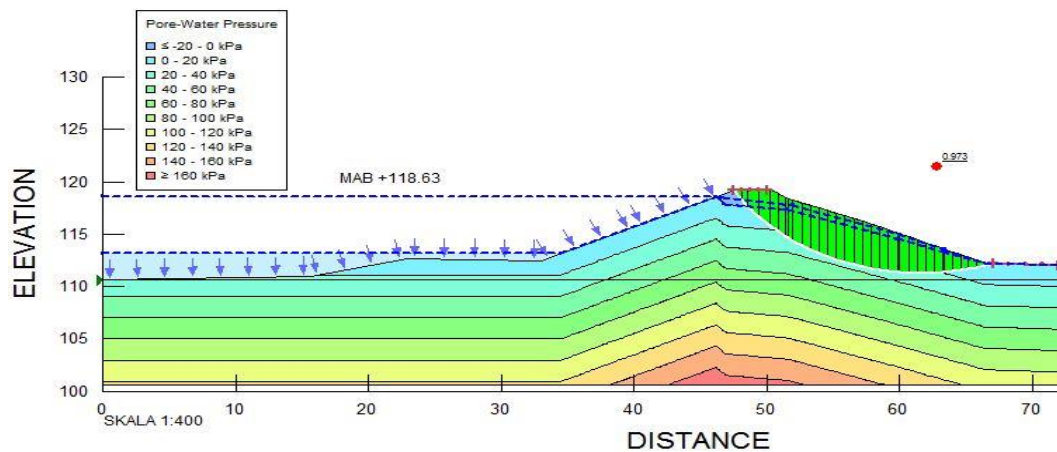
Gambar 5. 52 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.52. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* tanpa beban gempa sebesar 2,100 dan radius sebesar 16,565.



Gambar 5. 53 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.53. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* dengan beban gempa OBE sebesar 1,653 dan radius sebesar 16,565.



Gambar 5. 54 Hasil Perhitungan Stabilitas Downstream Pengaruh Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual pada Kondisi Surut Cepat

Dari hasil analisis pemodelan GeoStudio seperti pada Gambar 5.54. Didapatkan hasil angka keamanan (*Safety Factor*) stabilitas untuk *downstream* dengan beban gempa MDE sebesar 0,988 dan radius sebesar 16,565.

5.7 Pembahasan

5.8.1 Pembahasan Rembesan

1. Pembahasan debit rembesan

Berdasarkan analisis manual dengan metode Casagrande dan hasil output dari *SEEP/W* untuk menghitung debit rembesan dapat dilihat pada Tabel 5.2 rekapitulasi dibawah ini.

Tabel 5. 2 Rekapitulasi Hasil Debit Rembesan

No	Kondisi	Hasil manual	Hasil software
1	Muka air banjir	$1,66 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{dt}$	$4,538 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{dt}$
2	Muka air normal	$1,25 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{dt}$	$3,931 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{dt}$
3	Muka air minimum	$1,06 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{dt}$	$4,966 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{dt}$

Batas aman rembesan berdasarkan debitnya mengikuti Pedoman Grouting Untuk Bendungan Departemen Pekerjaan Umum-SDA yang mengacu pada batasan yang berlaku di Jepang (*Japanese Institute of Irrigation and Drainage 1988*) nilai angka rembesan yang diperkenankan pada bendungan yaitu sebanyak total rembesan dari waduk yang melewati pondasi dan badan bendungan tidak boleh lebih dari 1% rata-rata debit sungai yang masuk ke dalam waduk. Pada bendungan Saradan nilai rata-rata debit sungai sebesar $0,6 \text{ m}^3/\text{det}$ (PT. Multihera Harapan, 2020). Sehingga untuk 1% nya didapatkan sebesar $0.006 \text{ m}^3/\text{dt}$. Berikut ini hasil evaluasi keamanan bendungan berdasarkan debit rembesan yang dapat dilihat pada Tabel 5.3 sebagai berikut.

Tabel 5. 3 Hasil Evaluasi Keamanan Bendungan Saradan Berdasarkan Debit Rembesan

No	Kondisi	Hasil manual			Hasil software		
		Hasil	Syarat	Status	Hasil	Syarat	Status
1	Muka air banjir	0,000166 x 10 ⁻³ m ³ /dt	< 6 x 10 ⁻³ m ³ /dt	Aman	0,00421 x 10 ⁻³ m ³ /dt	< 6 x 10 ⁻³ m ³ /dt	Aman
2	Muka air normal	0,000125 x 10 ⁻³ m ³ /dt	< 6 x 10 ⁻³ m ³ /dt	Aman	0,00402 x 10 ⁻³ m ³ /dt	< 6 x 10 ⁻³ m ³ /dt	Aman
3	Muka air minimum	0,0000106 x 10 ⁻³ m ³ /dt	< 6 x 10 ⁻³ m ³ /dt	Aman	0,000498 x 10 ⁻³ m ³ /dt	< 6 x 10 ⁻³ m ³ /dt	Aman

Berdasarkan hasil perhitungan manual dan permodelan *SEEP/W* yang ditunjukkan pada Tabel 5.3, dapat disimpulkan bahwa bendungan Saradan aman dari analisis debit rembesan. Ada perbedaan hasil perhitungan debit rembesan antara perhitungan manual dan *software* GeoStudio *SEEP/W*, tetapi kedua perhitungan tersebut masih dalam keadaan aman sesuai dengan syaratnya.

2. Gradien hidrolis

Berdasarkan hasil analisis manual dengan metode Casagrande dan hasil output dari *SEEP/W* dapat dilihat pada Tabel 5.4 berikut ini.

Tabel 5. 4 Rekapitulasi Hasil Gradien Hidrolis

No	Kondisi	Hasil
1	Muka air banjir	1,96
2	Muka air normal	2,26
3	Muka air minimum	9,34

Berdasarkan Harza (1935) dalam Hardiyatmo (2017) dikatakan bahwa nilai faktor keamanan bangunan air berupa perbandingan antara nilai gradient hidrolis

kritis dengan gradient keluar maksimum harus lebih besar dari 3 sampai 4. Syarat keamanan bendungan berdasarkan gradien hidrolis dirumuskan sebagai berikut. Syarat keamanan: ($\frac{i_c}{i_e} > 3$ s/d 4). Bendungan Saradan merupakan bendungan urugan homogen sehingga angka keamanan terhadap gradien hidrolis yang diambil adalah 3. Berikut ini hasil evaluasi dari gradien hidrolis dapat dilihat pada Tabel 5.5.

Tabel 5. 5 Hasil Evaluasi Keamanan Bendungan Saradan Berdasarkan Gradien Hidrolis Rembesan

No	Kondisi	Hasil manual		
		Hasil	Syarat	Status
1	Muka air banjir	1,96	SF>3	Tidak Aman
2	Muka air normal	2,26	SF>3	Tidak Aman
3	Muka air minimum	9,34	SF>3	Aman

Berdasarkan hasil perhitungan manual yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa bendungan saradan tidak aman dari tinjauan gradien hidrolis pada kondisi muka air banjir dan muka air normal. Tetapi aman pada kondisi muka air minimum.

5.8.2 Pembahasan Stabilitas

Berikut ini hasil dari perhitungan stabilitas bendungan menggunakan metode Bishop dengan dengan garis freatik yang dibuat dengan metode Casagrande yang dapat dilihat pada Tabel 5.6 sebagai berikut.

Tabel 5. 6 Rekapitulasi Stabilitas Lereng dengan Garis Freatik Manual

SITUASI	U/D	TANPA GEMPA			GEMPA OBE			GEMPAMDE		
		TANPA GEMPA	SYARAT	STATUS	GEMPA	SYARAT (SNI)	STATUS	GEMPA	SYARAT	STATUS
MAB	U	6.005	1.5	AMAN	3.452	1.2	AMAN	1.457	1	AMAN
	D	2.069	1.5	AMAN	1.628	1.2	AMAN	0.972	1	TIDAK
MAN	U	5.037	1.5	AMAN	3.124	1.2	AMAN	1.407	1	AMAN

Lanjutan Tabel 5. 7 Rekapitulasi Stabilitas Lereng dengan Garis Freatik Manual

SITUASI	U/D	TANPA GEMPA			GEMPA OBE			GEMPAMDE		
		TANPA GEMPA	SYARAT	STATUS	GEMPA	SYARAT (SNI)	STATUS	GEMPA	SYARAT	STATUS
MAM	D	2.186	1.5	AMAN	1.721	1.2	AMAN	1.028	1	AMAN
	U	2.541	1.5	AMAN	2.031	1.2	AMAN	1,245	1	AMAN
	D	2.696	1.5	AMAN	2.119	1.2	AMAN	1.269	1	AMAN
RDD	U	1.899	1.3	AMAN	1.541	1.1	AMAN	0.973	1	TIDAK
	D	2.071	1.3	AMAN	1.629	1.1	AMAN	0.924	1	TIDAK

Dari hasil yang diperoleh pada Tabel 5.6 didapatkan bahwa pada semua kondisi muka air baik itu banjir, normal dan minimum didapatkan dalam kondisi aman pada *upstream* dan pada *downstreamnya* untuk kondisi dengan dengan beban gempa MDE tidak aman, sedangkan pada kondisi *rapid drawdown* dengan beban gempa MDE dalam kondisi tidak aman pada *upstreamnya* dan *downstreamnya*.

Berikut ini hasil perhitungan stabilitas bendungan menggunakan metode Bishop dengan garis freatik yang dibuat dengan menggunakan SEEP/W yang dapat dilihat pada Tabel 5.7 sebagai berikut.

Tabel 5. 8 Rekapitulasi Stabilitas Lereng dengan Garis Freatik Hasil SEEP/W

SITUASI	U/D	TANPA GEMPA			GEMPA OBE			GEMPA MDE		
		TANPA GEMPA	SYARAT	STATUS	GEMPA	SYARAT (SNI)	STATUS	GEMPA	SYARAT	STATUS
MAB	U	6.684	1.5	AMAN	3.776	1.2	AMAN	1.593	1	AMAN
	D	2.218	1.5	AMAN	1.741	1.2	AMAN	1.036	1	AMAN
MAN	U	5.432	1.5	AMAN	3.374	1.2	AMAN	1.523	1	AMAN
	D	2.299	1.5	AMAN	1.803	1.2	AMAN	1.074	1	AMAN
MAM	U	2.557	1.5	AMAN	2.045	1.2	AMAN	1.254	1	AMAN
	D	2.690	1.5	AMAN	2.114	1.2	AMAN	1.265	1	AMAN
RDD	U	1.887	1.3	AMAN	1.505	1.1	AMAN	0.919	1	TIDAK
	D	2.100	1.3	AMAN	1.653	1.1	AMAN	0.988	1	TIDAK

Dari hasil yang diperoleh pada Tabel 5.7 didapatkan bahwa pada semua kondisi muka air baik itu banjir, normal dan minimum didapatkan dalam kondisi aman pada *upstream* dan *downstreamnya*, sedangkan pada kondisi *rapid*

drawdown dalam kondisi tidak aman pada upstream dan pada *downstreamnya* dengan beban gempa MDE.



BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dengan melakukan analisis stabilitas dan rembesan pada Bendungan Saradan disimpulkan sebagai berikut.

1. Bendungan Saradan dikategorikan bendungan berisiko tinggi karena memiliki nilai tingkat risiko 26 point.
2. Bendungan Saradan pada kondisi muka air banjir dengan perhitungan angka keamanan stabilitas upstream dengan garis freatik manual tanpa adanya beban gempa memiliki nilai angka kemanan sebesar $6,005 > 1,5$ (Aman), dengan beban gempa OBE nilai angka keamanan sebesar $3,452 > 1,2$ (Aman), dengan beban gempa MDE angka keamanan sebesar $1,457 > 1$ (Aman), sedangkan untuk angka keamanan stabilitas downstream dengan garis freatik manual tanpa adanya beban gempa memiliki nilai angka kemanan sebesar $2,069 > 1,5$ (Aman), dengan beban gempa OBE nilai angka keamanan sebesar $1,628 > 1,2$ (Aman), dengan beban gempa MDE angka keamanan sebesar $0,972 > 1$ (Tidak Aman) .Kemudian perhitungan dengan permodelan GeoStudio didapat angka kemanan tanpa gempa $6,684 > 1,5$ (Aman), dengan beban gempa OBE $3,776 > 1,2$ (Aman), denganbebangempa MDE sebesar $1,593 > 1$ (Aman), sedangkan untuk angka keamanan stabilitas downstream dengan garis freatik manual tanpa adanya beban gempa memiliki nilai angka kemanan sebesar $2,218 > 1,5$ (Aman), dengan beban gempa OBE nilai angka keamanan sebesar $1,741 > 1,2$ (Aman), dengan beban gempa MDE angka keamanan sebesar $1,036 > 1$ (Aman). Rembesan yang terjadi di bendungan Saradan dengan garis freatik manual sebesar $1,66 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{dt}$, sedangkan dengan SEEP/W sebesar $4,538 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{dt}$. Analisis gradient hidrolis pada kondisi muka air banjir didapatkan nilai SF sebesar 1,96.

3. Bendungan Saradan pada kondisi muka air normal dengan perhitungan angka keamanan stabilitas upstream dengan garis freatik manual tanpa adanya beban gempa memiliki nilai angka kemanan sebesar $5,037 > 1,5$ (Aman), dengan beban gempa OBE nilai angka keamanan sebesar $3,124 > 1,2$ (Aman), dengan beban gempa MDE angka keamanan sebesar $1,407 > 1$ (Aman), sedangkan untuk angka keamanan stabilitas downstream dengan garis freatik manual tanpa adanya beban gempa memiliki nilai angka kemanan sebesar $2,186 > 1,5$ (Aman), dengan beban gempa OBE nilai angka keamanan sebesar $1,721 > 1,2$ (Aman), dengan beban gempa MDE angka keamanan sebesar $1,028 > 1$ (Tidak Aman) . Kemudian perhitungan dengan permodelan Geoslope didapat angka kemanan tanpa gempa $5,432 > 1,5$ (Aman), dengan beban gempa OBE $3,374 > 1,2$ (Aman), denganbebangempa MDE sebesar $1,523 > 1$ (Aman), sedangkan untuk angka keamanan stabilitas downstream tanpa adanya beban gempa memiliki nilai angka kemanan sebesar $2,299 > 1,5$ (Aman), dengan beban gempa OBE nilai angka keamanan sebesar $1,803 > 1,2$ (Aman), dengan beban gempa MDE angka keamanan sebesar $1,074 > 1$ (Aman). Rembesan yang terjadi di bendungan Saradan dengan garis freatik manual sebesar $1,25 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{dt}$ dan dengan SEEP/W sebesar $3,931 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{dt}$. Analisis gradient hidrolis pada kondisi muka air normal didapatkan nilai SF sebesar 2,26.
4. Bendungan Saradan pada kondisi muka air minimum dengan perhitungan angka keamanan stabilitas upstream dengan garis freatik manual tanpa adanya beban gempa memiliki nilai angka kemanan sebesar $2,541 > 1,5$ (Aman), dengan beban gempa OBE nilai angka keamanan sebesar $2,031 > 1,2$ (Aman), dengan beban gempa MDE angka keamanan sebesar $1,245 > 1$ (Aman), sedangkan untuk angka keamanan stabilitas downstream dengan garis freatik manual tanpa adanya beban gempa memiliki nilai angka kemanan sebesar $2,696 > 1,5$ (Aman), dengan beban gempa OBE nilai angka keamanan sebesar $2,119 > 1,2$ (Aman), dengan beban gempa MDE angka keamanan sebesar $1,269 > 1$ (Tidak Aman) .Kemudian perhitungan dengan permodelan Geoslope didapat angka kemanan tanpa gempa $2,557 >$

1,5 (Aman), dengan beban gempa OBE 2,045 > 1,2 (Aman), dengan beban gempa MDE sebesar 1,254 > 1 (Aman), sedangkan untuk angka keamanan stabilitas downstream tanpa adanya beban gempa memiliki nilai angka keamanan sebesar 2,690 > 1,5 (Aman), dengan beban gempa OBE nilai angka keamanan sebesar 2,114 > 1,2 (Aman), dengan beban gempa MDE angka keamanan sebesar 1,265 > 1 (Aman). Rembesan yang terjadi di bendungan Saradan dengan garis freatik manual sebesar $1,06 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{dt}$ dan dengan SEEP/W sebesar $4,966 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{dt}$. Analisis gradient hidrolis pada kondisi muka air minimum didapatkan nilai SF sebesar 9,34.

5. Bendungan Saradan pada kondisi surut cepat (*Rapid Drawdown*) dengan perhitungan angka keamanan stabilitas upstream dengan garis freatik manual tanpa adanya beban gempa memiliki nilai angka keamanan sebesar 1,899 > 1,5 (Aman), dengan beban gempa OBE nilai angka keamanan sebesar 1,514 > 1,2 (Aman), dengan beban gempa MDE angka keamanan sebesar 0,973 > 1 (Aman), sedangkan untuk angka keamanan stabilitas downstream dengan garis freatik manual tanpa adanya beban gempa memiliki nilai angka keamanan sebesar 2,071 > 1,5 (Aman), dengan beban gempa OBE nilai angka keamanan sebesar 1,629 > 1,2 (Aman), dengan beban gempa MDE angka keamanan sebesar 0,924 > 1 (Tidak Aman). Kemudian perhitungan dengan permodelan Geoslope didapat angka keamanan tanpa gempa 1,887 > 1,5 (Aman), dengan beban gempa OBE 1,505 > 1,2 (Aman), dengan beban gempa MDE sebesar 0,919 > 1 (Aman), sedangkan untuk angka keamanan stabilitas downstream tanpa adanya beban gempa memiliki nilai angka keamanan sebesar 2,100 > 1,5 (Aman), dengan beban gempa OBE nilai angka keamanan sebesar 1,653 > 1,2 (Aman), dengan beban gempa MDE angka keamanan sebesar 0,988 > 1 (Tidak Aman).

6.2. Saran

Berdasarkan kesimpulan yang telah dipaparkan diatas maka dapat disarankan hal-hal sebagai berikut.

1. Pada penelitian selanjutnya, perlu dilakukan perbandingan antara debit rembesan hasil manual dan software dengan hasil pembacaan V-notch dilapangan.
2. Perlu dilakukan analisis stabilitas dengan menggunakan data pembacaan piezometer di lapangan.
3. Pada kondisi stabilitas yang tidak aman perlu dilakukan analisis alihan tetap (makdisi dan seed) dan analisis secara dinamik.



DAFTAR PUSTAKA

- Air, D. J. (2006). *Analisis Dinamik Bendungan Urugan*. Jakarta: Direktorat Jenderal Sumber Daya Air.
- Air, D. J. (2008). *Analisis Dinamik Bendungan Urugan*. Jakarta: Direktorat Jenderal Sumber Daya Air.
- Imron, D. S. (2017). Analisa Geoteknik Bendungan Gongseng terhadap Keamanan Rembesan, Stabilitas Lereng, dan Beban Gempa. *Jurnal Karya Teknik Sipil* , 6, 83-90.
- Bowles, J. E. (1984). *Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)*. Jakarta: Erlangga.
- Das, B. (1995). *Mekanika Tanah : Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Dipa, A. R. (2017). Evaluasi Keamanan Tubuh Bendungan Saradan. *Universitas Islam Indonesia*.
- Hamdhan, I. (2019). Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Bajulmati dengan Metode Elem Hingga Model 2D dan 3D. *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional* .
- Hardiyatmo, H.C (2002). *Mekanika Tanah 2 Edisi 3*. Yogyakarta: Gadjah Mada University.
- Hardiyatmo, H.C (2017). *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

- Hla Myat Htwe, T. N. (2017). Seepage and Slope Stability Analysis of Myittha Multipurpose Dam Project, Gangaw Township, Magway Region, Myanmar. *Regional Conference in Civil Engineering (RCCE)* , 411-418.
- Indonesia, S. N. (2017). *Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Konstruksi, P. P. (2008). *Modul Analisa Stabilitas Bendungan : Perhitungan Rembesan*. Bandung: Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi.
- Konstruksi, P. P. (2017). *Modul Analisa Stabilitas Bendungan : Stabilitas Lereng*. Bandung: Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi.
- Sholeh. (2019). Analisis Stabilitas Tubuh Bendungan pada Bendungan Utama Proyek Waduk Bendo Ponorogo. *Jurnal Teknik Sipil* , 13, 83-92.
- Nasional, P. S. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia*. Bandung: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- PT Multimer Harapan. (2020). *Laporan Hidrologi*. Semarang.
- Sosrodarsono, S., & Takeda, K. (1977). *Bendungan Tipe Urugan*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Standar Nasional Indonesia. (2016). *SNI 8064:2016 (Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Urugan)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Sunday, D. dan Azmeri. (2013). *Kajian Kestabilan Tubuh Waduk Rukoh Kecamatan Titieu Keumala Kabupaten Pidie*. (<https://scholar.google.co.id>)
- Wilayah, D. P. (2004). *Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa*. Jakarta: Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah.

LAMPIRAN



Lampiran 1 Data Teknis Bendungan Saradan

	Dam And Structures Surveys, 1997*)	Inspeksi Besar Bendungan Saradan, 2016**)	Penyusunan Pola Operasi dan Pedoman Operasi Pemeliharaan, 2018 ***)	Data Teknis Analisis dan Kajian Konsultan, 2020
Umum				
a. Lokasi	Desa Saradan, Kecamatan Saradan, Kabupaten Madiun, Provinsi Jawa Timur	Desa Sugihwaras, Kecamatan Saradan, Kabupaten Madiun, Provinsi Jawa Timur	Desa Sugihwaras, Kecamatan Saradan, Kabupaten Madiun, Provinsi Jawa Timur	Desa Pajajaran, Kecamatan Saradan, Kabupaten/Kota Madiun, Provinsi Jawa Timur
b. Manfaat	• Irigasi : - Ha • Pariwisata	• Irigasi : 990 Ha • Pariwisata	• Irigasi : 802 Ha • Pariwisata dan Perikanan	• Irigasi : 802 Ha • Pariwisata dan Perikanan
c. Tahun konstruksi	1942	1942	1942	1942
d. Pengelola	Balai PSDA Madiun	BBWS Bengawan Solo	BBWS Bengawan Solo	BBWS Bengawan Solo
Hidrologi				
a. Sungai	K. Lemah Bang, K. Ulo, Kali Mati	Tidak ada sungai	K. Saradan	Sungai : K. Madiun Anak Sungai: Lemah Bang, Ulo, Kali Mati
b. Luas daerah aliran sungai	4,88 km ²	4,88 km ²	3,83 km ²	3,83 km ²
Bendungan				
a. Tipe	Urugan tanah homogen	Tanah homogen	Tanah homogen	Tanah homogen
b. Tinggi dari dasar sungai	9,00 m	8,40 m	8,40 m	8,40 m
c. Panjang puncak	800 m	730 m	730 m	730 m
d. Lebar puncak	3,00 m s/d 6,00 m	3,00 m s/d 6,00 m	3,00 m s/d 6,00 m	3,00 m s/d 6,00 m
e. Elevasi puncak	El. +118,50 m	El. +146,61 m	El. +146,61 m	El. +119,20 m
Pelimpah				
a. Tipe	Pelimpah tanpa pintu	Pelimpah tanpa pintu konstruksi beton	Ogee tanpa pintu	Ogee tanpa pintu

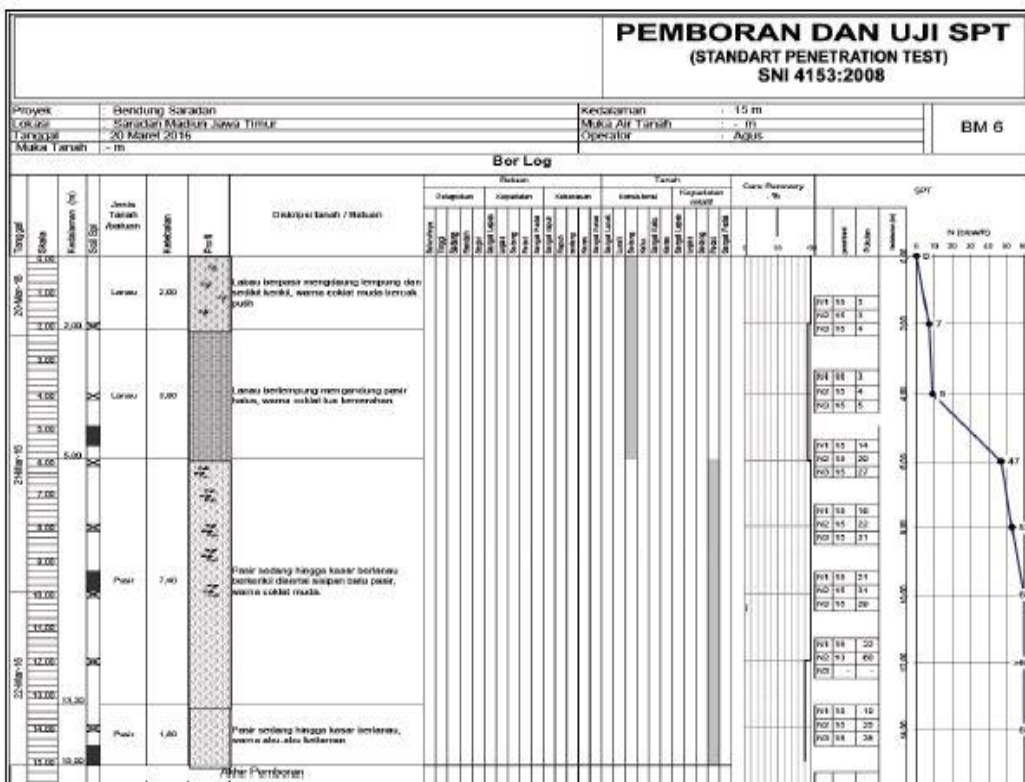
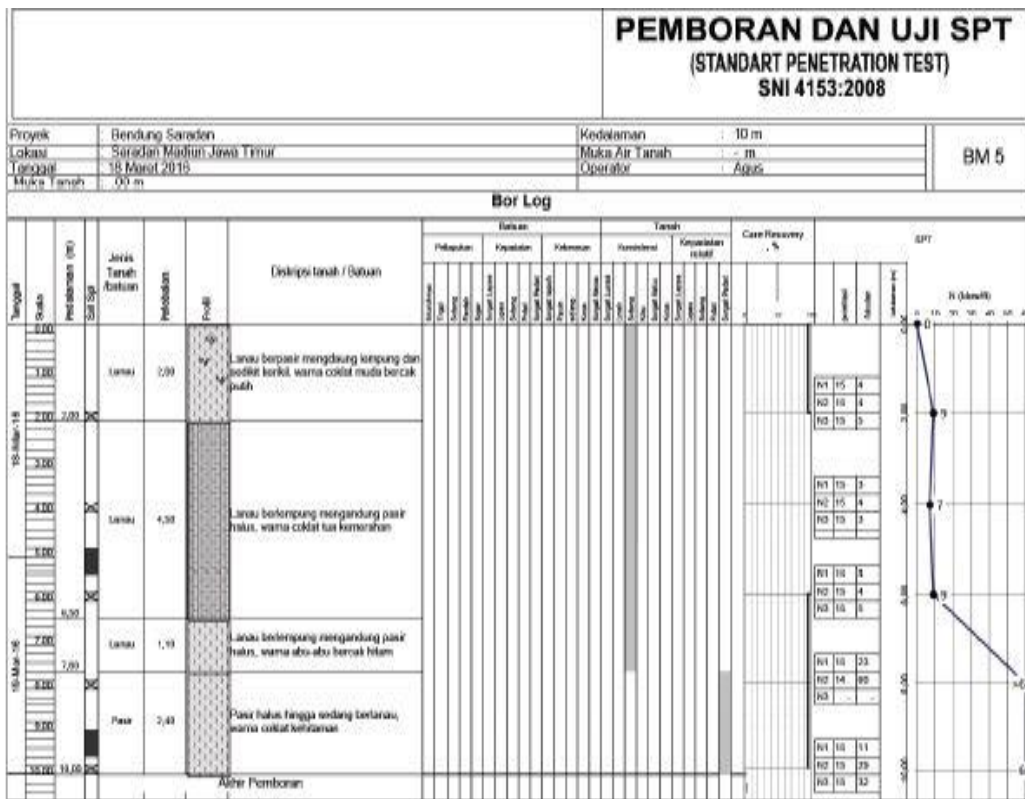
	Dam And Structures Surveys, 1997*)	Inspeksi Besar Bendungan Saradan, 2016**)	Penyusunan Pola Operasi dan Pedoman Operasi Pemeliharaan, 2018 ***)	Data Teknis Analisis dan Kajian Konsultan, 2020
b. Elevasi mercu	El. +117,50 m	El. +145,25 m	El. +145,25 m	El. +118,00 m
c. Lebar mercu bersih	10,70 m	8,04 m	8,40 m	10,80 m
Bangunan Pengambilan				
a. Tipe	Tidak ada data	Slide gate, tangkai spindle	Slide gate, tangkai spindle	Slide gate, tangkai spindle
b. Panjang stang spindle	Tidak ada data	7,50 m	7,50 m	7,50 m
c. Lebar pintu	Tidak ada data	1,00 m	1,00 m	1,00 m
d. Tinggi pintu	Tidak ada data	0,80 m	0,80 m	0,80 m
e. Jumlah pintu	Tidak ada data	1 buah	1 buah	1 buah
f. Cara pengoperasian	Tidak ada data	Manual	Manual	Manual
g. Head	Tidak ada data	Maksimum 8,4 m	Maksimum 8,4 m	Maksimum 8,4 m
h. Kapasitas	Tidak ada data	5,33 m ³ /detik	5,33 m ³ /detik	5,33 m ³ /detik
Instrumentasi				
a. Pisometer pipa tegak	9 buah	9 buah	9 buah	9 buah
b. Patok geser	Tidak ada data	Tidak ada data	9 buah	3 buah
c. Peilschaal	1 buah	2 buah	2 buah	2 buah
d. Pos curah hujan	1 unit	1 unit	1 unit	1 unit (manual)
e. Alat ukur debit	Tidak ada data	1 buah	1 buah ambang lebar	1 buah ambang lebar



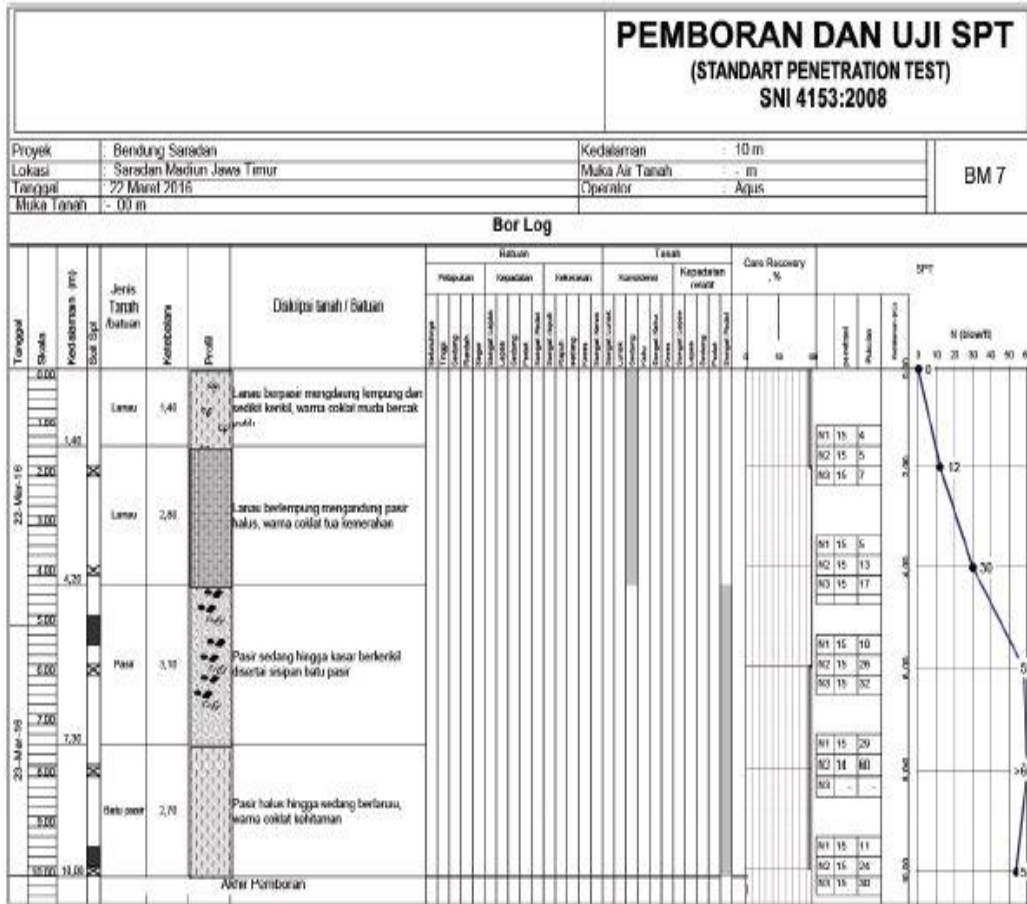
Lampiran 2 Hasil Laboratorium

No	Jenis Parameter	Bagian Zona Bendungan	
		Tubuh Bendungan	Pondasi Bendungan
1	Jenis Tanah	Lanau Lempung	Pasir Berlanau
2	NSPT	7 - 9	30 - >30
3	Klasifikasi USCS (Cassagrande)	MH	SM
4	Berat Jenis Gs	2,649 - 2,688	2,523 - 2,7
5	Kadar air asli, wn %	25,82 - 42,12	22,85 - 42,22
6	Berat isi basah, γ_n gr/cm ³	1,685 - 1,779	1,632 - 1,783
7	Berat isi kering γ_{dgr} /cm ³	1,187 - 1,365	1,183 - 1,435
8	Berat isi jenuh γ_{sgr} /cm ³ - -
9	Indeks plastisitas PI %	21,22 - 29,33	8,11 - 24,98
10	Gradasi ukuran butir : - Kerikil %	0 - 9,67	0 - 13,85
	- Pasir %	8,70 - 60,82	6,42 - 89,81
	- Lanau %	29,51 - 79,34	21,44 - 80,55
	- Lempung %	0 - 17,32	0 - 16,3
11	Kuat Tekan Bebas q_u kg/cm ² - -
	C_u kg/cm ² - -
12	Triaxial - UU : Kohesi, c kg/cm ²	0,05 - 0,2	0,1 - 0,4
	Sudut geser dalam, φ°	13,26 - 19,17	15,22 - 21,94
13	Triaxial - CU : Kohesi efektif, c' kg/cm ²	0,11 - 0,21	0,16 - 0,39
	Sudut geser dalam efektif, φ'°	14,40 - 21,57	18,39 - 24,74
14	Konsolidasi : Indeks kompresi Cc	0,233 - 0,299	0,216 - 0,263
	Koefisien konsolidasi C_v cm ² /det	1,367 - 3,272	1,450 - 3,077
15	Koefisien permeabilitas (insitu) k cm/det	8,87E-10 - 1,45E-08	2,47E-09 - 2,33E-08

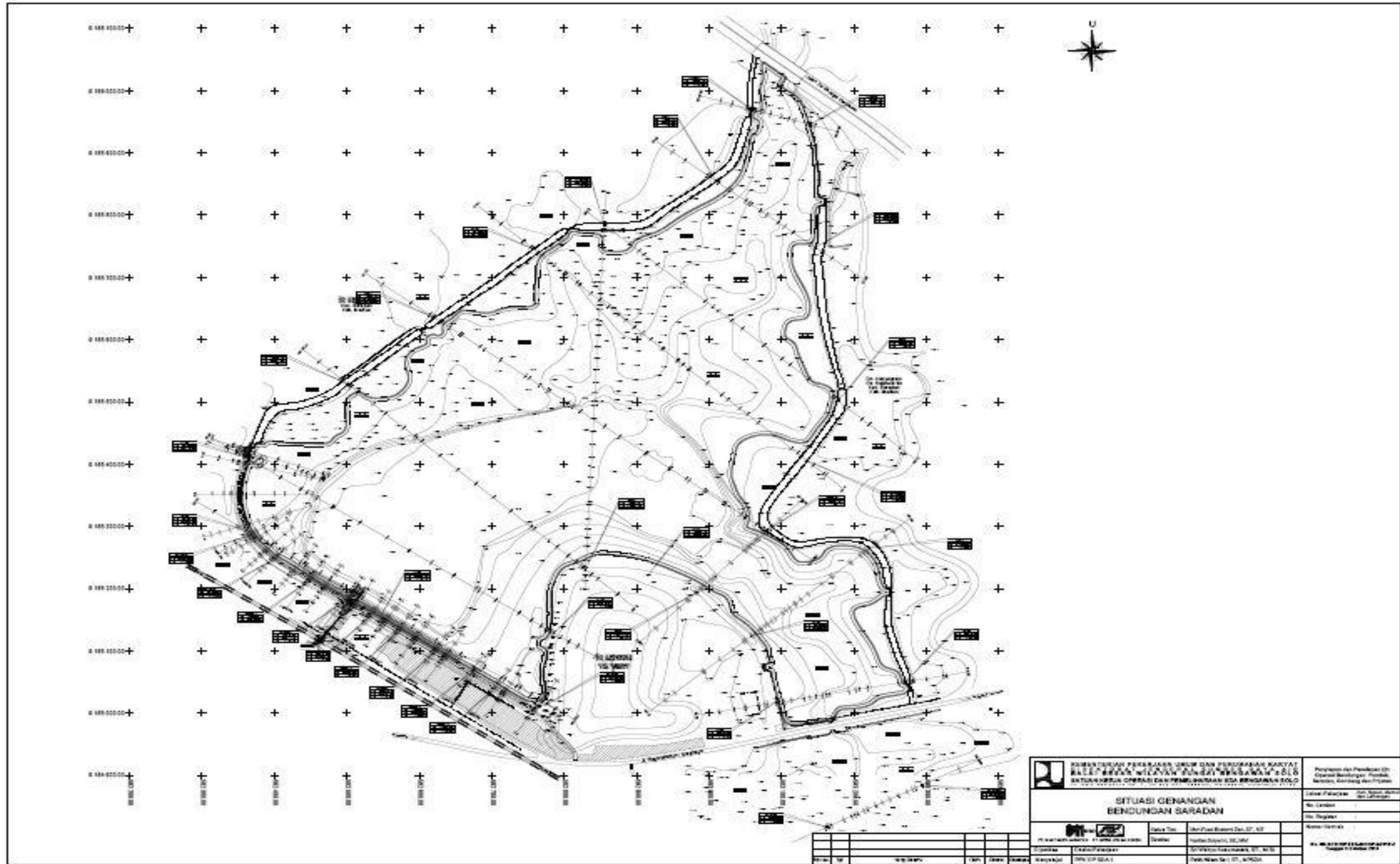
Lampiran 3 Bor Log



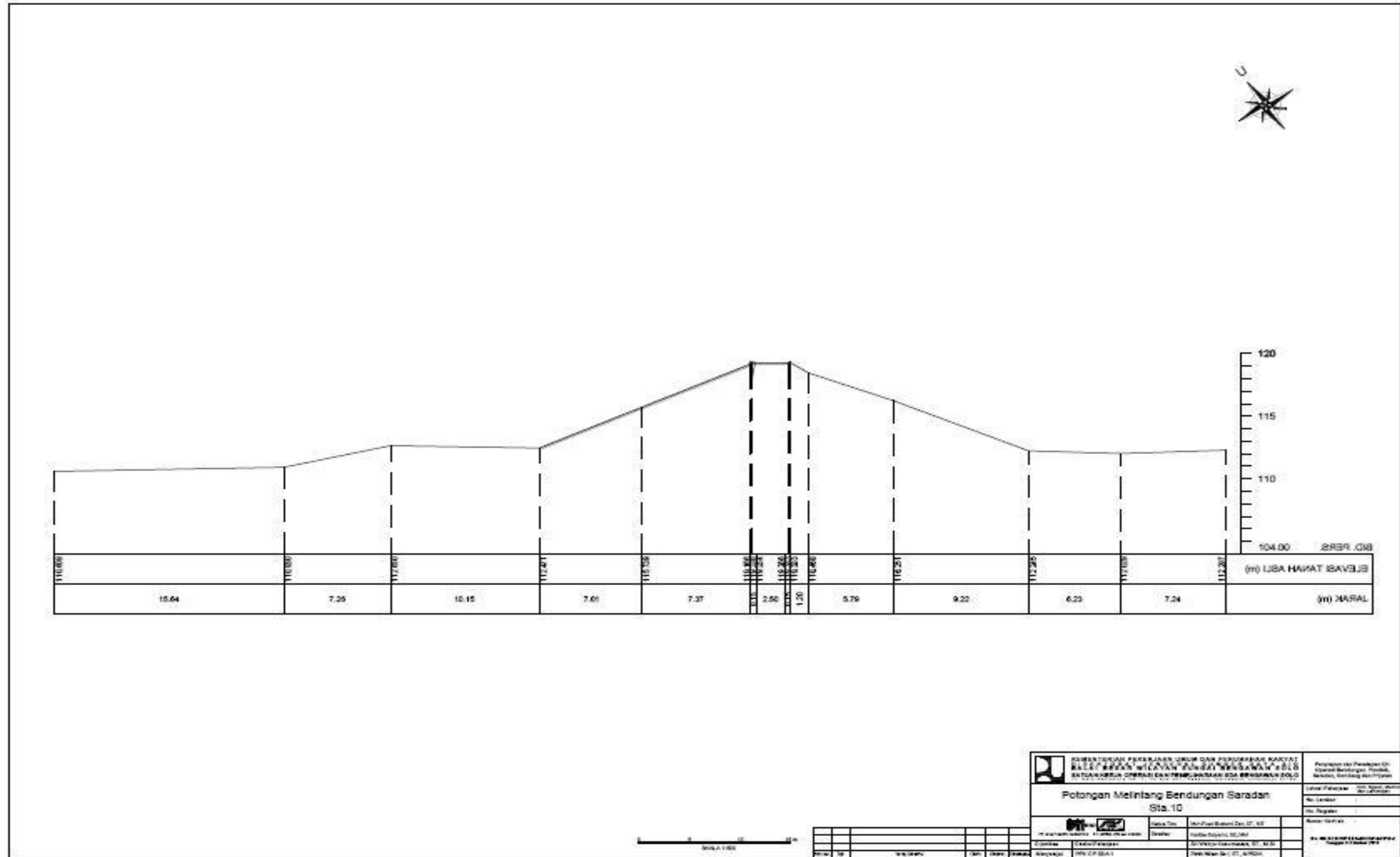
Sumber Data: pengukuran 2014



Lampiran 4 Peta Situasi Bendungan Saradan



Lampiran 5 Potongan Melintang Bendungan Saradan Sta.10



		Direktorat Jenderal Operasi Bendungan, Pemeliharaan, Pemantauan dan Rehabilitasi
Potongan Melintang Bendungan Saradan Sta. 10		
No. Lembar : No. Revisi : No. Skala :	Tanggal : Lokasi :	No. Dokumen : No. Revisi :
Disusun oleh : Ditinjau oleh : Disetujui oleh :	Nama : Jabatan :	Nama : Jabatan :