

## **TUGAS AKHIR**

### **ANALISIS REMBESAN DAN STABILITAS PADA TUBUH BENDUNGAN**

*(ANALYSIS OF SEEPAGE AND STABILITY OF THE BODY OF DAM)*

**(Studi Kasus : Bendungan Krisak, Kab Wonogiri Jawa Tengah)**

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



**Desy Setiyawati**

**15511247**

**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA  
2023**

## TUGAS AKHIR

### ANALISIS REMBESAN DAN STABILITAS PADA TUBUH BENDUNGAN

(Studi Kasus : Bendungan Krisak, Kab Wonogiri Jawa Tengah)



Telah diterima sebagai salah satu persyaratan  
Untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal : 24 Januari 2023

Oleh Dewan Penguji :

Pembimbing

Penguji I

Penguji II

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

Anisa Nur Amalina, S.T., M.Eng.  
NIK : 215111305

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



Mengesahkan  
Ketua Program Studi Teknik Sipil

Ir. Yunalia Murtafi, S.T.,M.T.,Ph.D.  
NIK : 095110101

## 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 di kemudian 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.

Yogyakarta, Januari 2023

Yang membuat pernyataan,



Desy Setiyawati

## KATA PENGANTAR

*Assalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh*

*Alhamdulillah* puji syukur penyusun panjatkan kehadiran 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 Pada Tubuh Bendungan (Studi Kasus : Bendungan Krisak, Kab Wonogiri Jawa Tengah)*. 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 Ir. Akhmad Marzuko, M.T. selaku Dosen Penguji Tugas Akhir yang telah memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyusunan dan penulisan tugas akhir ini.
3. Ibu Anisa Nur Amalina, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji Tugas Akhir yang telah memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyusunan dan penulisan tugas akhir ini.
4. Ibu Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Program Studi Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

5. Bapak Nardi dan Ibu Sri Murwati sebagai orang tua penulis yang senantiasa selalu memberikan doa, semangat dan dukungan yang tak henti – hentinya.
6. Seluruh kakak kakak penulis, Mulyani, Puji Astuti, Tri Santoso, Legiman, Yasin Asghaf, Ima Amalia yang senantiasa selalu memberikan doa, semangat dan dukungan yang tak henti – hentinya.
7. Seluruh civitas akademik di lingkungan jurusan Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia
8. Teman – teman seperjuangan Teknik Sipil 2015 yang selalu memberikan dukungan, dorongan dan semangat.
9. Semua pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu per satu, dalam membantu penyusunan Tugas Akhir ini dengan tulus dan ikhlas.

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

*Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh*

Yogyakarta, 24 Januari 2023

Desy Setiyawati

## DAFTAR ISI

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR NOTASI	xvii
ABSTRAK	xx
ABSTRACT	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
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. Penelitian Sebelumnya	5
2.1.1. Analisis Stabilitas Lereng	5
2.1.2. Analisis Rembesan	9
2.3. Keaslian Penelitian	11
BAB III LANDASAN TEORI	15
3.1. Tanah	15
3.3.1. Tinjauan Umum	15
3.3.2. Tanah Lempung	15
3.3.3. Sifat Fisik Tanah	16

3.3.4. Batas-batas <i>Atterberg</i>	20
3.3.5. Sifat Mekanika Tanah	22
3.3.6. Permeabilitas Tanah	23
3.2. Bendungan	23
3.4.1. Pengertian Bendungan	23
3.4.2. Klasifikasi Bendungan	23
3.4.3. Fungsi Bendungan	24
3.4.4. Konsep Keamanan Bendungan	26
3.4.5. Rembesan Tubuh Bendungan	31
3.4.6. Stabilitas Lereng Tubuh Bendungan	34
3.3. Software Geostudio	44
<b>BAB IV METODE PENELITIAN</b>	46
4.1. Subjek Penelitian	46
4.2. Objek Penelitian	47
4.3. Perangkat Lunak Pendukung Penelitian	47
4.4. Tahap Penelitian	47
4.4.1. Studi Pustaka	47
4.4.2. Pengumpulan Data	48
4.4.3. Penentuan Tingkat Risiko Bendungan	54
4.4.4. Penentuan Beban Gempa	54
4.4.5. Analisis Rembesan	55
4.4.6. Analisis Stabilitas Lereng	55
4.5. Bagan Penelitian	56
<b>BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN</b>	61
5.1. Tingkat Risiko Bendungan Krisak	61
5.2. Koefisien Gempa	61
5.3. Perhitungan Rembesan	62
5.3.1. Debit Rembesan	62
5.3.2. Gradien Hidraulik	66



5.4. Perhitungan Stabilitas Lereng	67
5.4.1. Perhitungan Stabilitas lereng Manual	67
5.4.2. Stabilitas Lereng dengan Garis Freatik Manual	69
5.4.3. Stabilitas Lereng dengan Garis Freatik Output Seep/W	79
5.5. Pembahasan	89
5.5.1. Pembahasan Rembesaan	89
5.5.2. Stabilitas Lereng	90
<b>BAB VI PENUTUP</b>	<b>93</b>
6.1. Kesimpulan	93
6.2. Saran	95
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	<b>96</b>
<b>LAMPIRAN</b>	<b>98</b>





## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu	12
Tabel 3. 1 Nilai Sudut Geser Dalam Berdasarkan Jenis Tanah	22
Tabel 3. 2 Kriteria Faktor Risiko Untuk Evaluasi Keamanan Bendungan	39
Tabel 3. 3 Kelas Risiko Bendungan dan Bangunan Air	40
Tabel 3. 4 Kriteria Beban Gempa Untuk Desain Bendungan	40
Tabel 3. 5 Faktor Amplikasi (FPGA)	41
Tabel 3. 6 Penentuan Prosedur Analisis	42
Tabel 3. 7 Persyaratan Faktor Minimum Stabilitas Lereng Bendungan	43
Tabel 4. 1 Data Teknis Bendungan Krisak	49
Tabel 4. 2 Data Tanah	54
Tabel 5. 1 Hasil Perhitungan Faktor Risiko	61
Tabel 5. 2 Koefisien Gempa	61
Tabel 5. 3 Kondisi Aliran Filtrasi	66
Tabel 5. 4 Perhitungan Gradien Hidraulik	67
Tabel 5. 5 Rekapitulasi Perhitungan Manual Stabilitas Lereng Dengan Metode Fellenius	69
Tabel 5. 6 Rekapitulasi Hasil Rembesan Bendungan Krisak	89
Tabel 5. 7 Rekapitulasi Perhitungan Gradien Hidraulik	90
Tabel 5. 8 Hasil Rekapitulasi Stabilitas Lereng Keadaan OBE Bendungan Krisak dengan Garis Freatik Perhitungan Manual	90
Tabel 5. 9 Hasil Rekapitulasi Stabilitas Lereng Keadaan MDE Bendungan Krisak dengan Garis Freatik Perhitungan Manual	91
Tabel 5. 10 Hasil Rekapitulasi Stabilitas Lereng Keadaan OBE Bendungan Krisak Garis Freatik Output Seep/W	91
Tabel 5. 11 Hasil Rekapitulasi Stabilitas Lereng Keadaan MDE Bendungan Krisak Garis Freatik Output Seep/W	92

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Batas-batas Atterberg	20
Gambar 3. 2 Kurva Untuk Penentuan Batas Cair Lempung	20
Gambar 3. 3 Grafik Casagrade	22
Gambar 3. 4 Tipe Bendungan Bendungan Urugan Pasir Dan Kerikil Dengan Lapis Kedap Air Tegak	24
Gambar 3. 5 Konsep Keamanan Bendungan	26
Gambar 3. 6 Hitungan Rembesan Cara Casagrande	33
Gambar 3. 7 Tipe-Tipe Keruntuhan Lereng	35
Gambar 3. 8 Bentuk Bentuk Bidang Longsor	36
Gambar 3. 9 Gaya-gaya yang Bekerja Pada Irisan	36
Gambar 3. 10 Tipe-Tipe Keruntuhan Lereng	45
Gambar 4. 1 Lokasi Bendungan Krisak	46
Gambar 4. 2 Peta Situasi Bendungan Krisak	51
Gambar 4. 3 Peta Situasi Bendungan Krisak	52
Gambar 4. 4 Potongan Melintang 0+147 Bendungan Krisak	53
Gambar 4. 5 Bagan Alir Penelitian	57
Gambar 4. 6 Bagan Alir Pemodelan Geostudio	60
Gambar 5. 1 Garis Rembesan Manual dengan Cara Casagrande Kondisi MAB	62
Gambar 5. 2 Garis Rembesan Manual dengan Cara Casagrande Kondisi MAN	63
Gambar 5. 3 Garis Rembesan Manual dengan Cara Casagrande Kondisi MAM	64
Gambar 5. 4 Hasil Analisis Rembesan Keadaan Muka Air Banjir Menggunakan Geostudio 2012 SEEP/W	65
Gambar 5. 5 Hasil Analisis Rembesan Keadaan Muka Air Normal Menggunakan Geostudio 2012 SEEP/W	66

Gambar 5. 6 Hasil Analisis Rembesan Keadaan Muka Air Minimum Menggunakan Geostudio 2012 SEEP/W	66
Gambar 5. 7 Keterangan Perhitungan Gradien Hidraulik Bendungan	66
Gambar 5. 8 Irisan Lereng Hulu	68
Gambar 5. 9 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Banjir Tanpa Beban Gempa dengan Garis Freatik Manual	70
Gambar 5. 10 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Banjir Dengan Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual	71
Gambar 5. 11 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Banjir Dengan Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual	71
Gambar 5. 12 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Banjir Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual	71
Gambar 5. 13 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Banjir Dengan Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual	72
Gambar 5. 14 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Banjir Dengan Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual	72
Gambar 5. 15 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Normal Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual	73
Gambar 5. 16 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Normal Dengan Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual	73

Gambar 5. 17 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Normal Dengan Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual	73
Gambar 5. 18 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Normal Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual	74
Gambar 5. 19 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Normal Dengan Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual	74
Gambar 5. 20 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Normal Dengan Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual	74
Gambar 5. 21 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Minimum Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual	75
Gambar 5. 22 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Minimum Dengan Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual	75
Gambar 5. 23 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Minimum Dengan Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual	75
Gambar 5. 24 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Minimum Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual	76
Gambar 5. 25 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Minimum Dengan Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual	76

Gambar 5. 26	Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Minimum Dengan Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual	76
Gambar 5. 27	Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Surut Cepat (RDD) Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual	77
Gambar 5. 28	Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Surut Cepat (RDD) Dengan Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual	77
Gambar 5. 29	Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Surut Cepat (RDD) Dengan Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual	78
Gambar 5. 30	Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Surut Cepat (RDD) Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual	78
Gambar 5. 31	Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Surut Cepat (RDD) Dengan Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual	78
Gambar 5. 32	Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Surut Cepat (RDD) Dengan Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual	79
Gambar 5. 33	Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Banjir Tanpa Beban Gempa	80
Gambar 5. 34	Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Banjir Dengan Beban Gempa OBE	80
Gambar 5. 35	Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Banjir Dengan Beban Gempa MDE	81
Gambar 5. 36	Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Banjir Tanpa Gempa	81

Gambar 5. 37 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Banjir Dengan Beban Gempa OBE	81
Gambar 5. 38 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Banjir Dengan Beban Gempa MDE	82
Gambar 5. 39 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Normal Tanpa Gempa	82
Gambar 5. 40 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Normal Dengan Gempa OBE	83
Gambar 5. 41 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Normal Dengan Gempa MDE	83
Gambar 5. 42 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Normal Tanpa Gempa	83
Gambar 5. 43 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Normal Dengan Gempa OBE	84
Gambar 5. 44 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Normal Dengan Gempa MDE	84
Gambar 5. 45 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Minimum Tanpa Gempa	84
Gambar 5. 46 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Minimum Dengan Gempa OBE	85
Gambar 5. 47 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Minimum Dengan Gempa MDE	85
Gambar 5. 48 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Minimum Tanpa Gempa	85
Gambar 5. 49 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Minimum Dengan Gempa OBE	86
Gambar 5. 50 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Minimum Dengan Gempa MDE	86

Gambar 5. 51 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Surut Cepat (RDD) Tanpa Gempa	87
Gambar 5. 52 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Surut Cepat (RDD) Dengan Gempa OBE	87
Gambar 5. 53 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Surut Cepat (RDD) Dengan Gempa MDE	87
Gambar 5. 54 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Surut Cepat (RDD) Tanpa Gempa	88
Gambar 5. 55 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Surut Cepat (RDD) Dengan Gempa OBE	88
Gambar 5. 56 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Surut Cepat (RDD) Dengan Gempa MDE	88






## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Peta Situasi	99
Lampiran 2 Denah Bangunan Bendungan	100
Lampiran 3 Potongan Melintang Bendungan	101
Lampiran 4 Bangunan Spillway	102
Lampiran 5 Bor Log Tubuh Bendungan Krisak (BH-01)	103
Lampiran 6 Bor Log Tubuh Bendungan Krisak (BH-02)	104
Lampiran 7 Bor Log Tubuh Bendungan Krisak (BH-03)	105



## DAFTAR NOTASI



$W$	= Kadar air (%)
$W_w$	= Berat air
$W_s$	= Berat butiran padat
$n$	= Porositas
$V_v$	= Volume rongga
$V$	= Volume total
$\gamma_b$	= Berat volume basah
$G_s$	= Berat jenis
$\gamma_w$	= Berat air
$e$	= angka pori
$\gamma_s$	= Berat volume padat
$W_s$	= Berat butiran padat
$V_s$	= Volume Padat.
$V_v$	= Volume rongga
$\gamma_d$	= Berat volume kering
$\gamma'$	= Berat volume apung
$LL$	= Batas Cair
$N$	= Jumlah pukulan pada kadar air
$W_N$	= Kadar air saat tanah tertutup
$tg.\beta$	= 0,121 (Tapi $tg. \beta$ tidak sama dengan 0,121 untuk semua jenis tanah)
$SL$	= Batas Susut
$m_1$	= Berat tanah basah dalam cawan percobaan (g)
$m_2$	= Berat tanah kering oven (g)
$v_1$	= Berat tanah basah dalam cawan (cm <sup>3</sup> )
$v_2$	= volume tanah kering oven (cm <sup>3</sup> )

PI	= Indeks Plastisitas
LL	= Batas cair
PL	= Batas plastis
$i_c$	= Gradien Hidrolik kritik
$i$	= Gradien keluar maksimum
$\Delta h$	= Perbedaan tinggi tekan pada titik peresapan air di lereng hulu dengan titik keluarannya di bagian hilir (m)
$\Delta L$	= Panjang aliran filtrasi (m)
R	= Jari-jari lingkaran bidang longsor
n	= Jumlah irisan
W	= Berat massa tanah irisan ke-i
q	= Sudut yang didefinisikan pada gambar diatas.
F	= Faktor aman.
c	= Kohesi tanah (kN/m-).
$\varphi$	= dalam tanah ( $^{\circ}$ )
$a_i$	= Panjang lengkung lingkaran pada irisan ke-i (m)
$W_i$	= Berat irisan tanah ke-i (kN).
$u_i$	= Tekanan air pori pada irisan ke-i (kN/m <sup>2</sup> )
$\theta$	= Sudut yang didefinisikan pada gambar diatas.
$FR_k$	= Faktor risiko kapasitas tampung
$FR_t$	= Faktor risiko tinggi bendungan
$FR_e$	= Faktor risiko kebutuhan evakuasi
$FR_h$	= Faktor risiko tingkat kerusakan
$PGA_M$	= Percepatan puncak di permukaan tanah
$F_{PGA}$	= Faktor amplikasi untuk PGA
$S_{PGA}$	= Percepatan tanah di permukaan
$PGA_M$	= Percepatan puncak di permukaan tanah

- $a_1$  = 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 ( $980 \text{ cm/det}^2$ )
- $K_0$  = Koefisien gempa desain terkoreksi di permukaan tanah.
- $\alpha_2$  = Koreksi pengaruh jenis struktur, untuk bendungan tipe urugan 0,5.
- $K_h$  = Koefisien gempa dasar yang tergantung periode ulang  $T$ .



## ABSTRAK

Bendungan Krisak adalah tipe urugan tanah homogen dari jenis tanah Lempungan. Tinggi bendungan 15 m dari dasar sungai dengan panjang puncak 350 m dan lebar puncak 5 m pada el. +115,00 m termasuk parapet. Bendungan Krisak memiliki umur bendungan yang sudah cukup lama, hingga kini ini masih dapat berfungsi dengan baik, meskipun mengalami penurunan kemampuan dalam memenuhi kebutuhan air irigasi. Perlu dilakukan evaluasi keamanan struktur tubuh bendungan yang berfokus pada evaluasi secara rembesan dan stabilitas lereng tubuh bendungan.

Analisis rembesan dilakukan pada tubuh bendungan dengan meninjau debit rembesan, kecepatan filtrasi dan gradien hidraulik. Analisis rembesan didapatkan dari hasil analisis dengan menggunakan SEEP/W. Analisis stabilitas dipengaruhi oleh tekanan air pori dalam beberapa kondisi yaitu muka air banjir, muka air normal dan muka air minimum berdasarkan hasil pembacaan running SEEP/W.). Stabilitas lereng dihitung dengan menggunakan software SLOPE/W dengan metode fellenius.

Rembesan paling kritis terjadi pada kondisi muka air banjir. Berdasarkan hasil analisis program GeoStudio 2012 rembesan yang terjadi dalam kondisi aman, dimana nilai debit rembesan sebesar 22,19 l/s lebih besar dari syarat yang ditentukan sebesar 38 l/s ( $Q_{rembesan} = 22,19 \text{ l/s} < Q_{syarat} = 38 \text{ l/s}$ ) dan Nilai gradien Hidraulik ( $i_c/i_e$ ) sebesar 4,55 lebih besar dari syarat yaitu 3. Sedangkan stabilitas tubuh bendungan paling kritis terjadi pada kondisi Pada kondisi surut cepat Bendungan Krisak berdasarkan hasil analisis program GeoStudio 2012 stabilitas lereng tubuh bendungan kondisi tanpa gempa dalam kondisi aman, nilai Faktor keamanan (FK) lereng hulu sebesar 1,997 lebih besar dari syarat yaitu 1,3 ( $FK = 1,997 > 1,3$ ), nilai faktor keamanan (FK) lereng hilir sebesar 4,030 lebih besar dari syarat yaitu 1,5 ( $FK = 4,030 > 1,5$ ). Pada stabilitas lereng tubuh bendungan kondisi gempa OBE dalam kondisi aman, nilai Faktor keamanan (FK) lereng hulu sebesar 1,713 lebih besar dari syarat yaitu 1,1 ( $FK = 1,713 > 1,1$ ), nilai faktor keamanan (FK) lereng hilir sebesar 3,178 lebih besar dari syarat yaitu 1,1 ( $FK = 3,178 > 1,1$ ). Pada stabilitas lereng tubuh bendungan kondisi gempa MDE dalam kondisi aman, nilai Faktor keamanan (FK) lereng hulu sebesar 1,340 lebih besar dari syarat yaitu 1,00 ( $FK = 1,340 > 1,00$ ), nilai faktor keamanan (FK) lereng hilir sebesar 2,262 lebih besar dari syarat yaitu 1,00 ( $FK = 2,262 > 1,00$ ).

**Kata kunci:** Stabilitas, Rembesan, Geostudio 2012.

## ABSTRACT

*The Krisak Dam is a homogeneous landfill type of clay soil type. The height of the dam is 15 m from the bottom of the river with a crest length of 350 m and a crest width of 5 m at el. +115.00 m including parapet. The Krisak Dam has a dam age that is long enough, until now it is still functioning properly, although it has experienced a decrease in its ability to meet irrigation water needs. It is necessary to evaluate the safety of the structure of the dam body which focuses on evaluating the seepage and slope stability of the dam body.*

*Seepage analysis is carried out on the body of the dam by reviewing seepage discharge, filtration rate and hydraulic gradient. Seepage analysis was obtained from the results of the analysis using SEEP/W. Stability analysis is affected by pore water pressure in several conditions, namely flood water level, normal water level and minimum water level based on the results of running SEEP/W.). Slope stability was calculated using the SLOPE/W software with the fellenius method.*

*The most critical seepage occurs at the flood water level. Based on the results of the analysis of the 2012 GeoStudio program, seepage that occurs in safe conditions, where the seepage rate of 22.19 l/s is greater than the specified requirement of 38 l/s ( $Q_{seepage} = 22.19 \text{ l/s} < Q_{condition} = 38 \text{ l/s}$ ) and the hydraulic gradient value ( $i_c/i_e$ ) of 4.55 is greater than the requirement of 3. While the most critical stability of the dam body occurs in fast wave conditions of the Krisak Dam based on the results of the 2012 GeoStudio program analysis stability of the slope of the dam body in conditions without an earthquake in safe conditions, the value of the factor of safety (FK) of the upstream slope is 1,997 greater than the requirement, which is 1.3 ( $FK = 1,997 > 1.3$ ), the value of the factor of safety (FK) of the downstream slope is 4,030, which is greater than the requirement, namely 1.5 ( $FK = 4.030 > 1.3$ ). In the stability of the slope of the body of the dam during the OBE earthquake under safe conditions, the value of the factor of safety (FK) on the upstream slope was 1.713 greater than the requirement, namely 1.1 ( $FK = 1.713 > 1.1$ ), the value of the factor of safety (FK) on the downstream slope was 3.178 greater than the requirement, namely 1.1 ( $FK = 3.178 > 1.1$ ). On the slope stability of the body of the dam under MDE earthquake conditions in a safe condition, the value of the factor of safety (FK) of the upstream slope is 1.340 greater than the requirement of 1.00 ( $FK = 1.340 > 1.00$ ), the value of the factor of safety (FK) of the downstream slope is 2.262 greater than the requirement, namely 1.00 ( $FK = 2.262 > 1.00$ ).*

*Keywords: Stability, Seepage, Geostudio 2012.*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

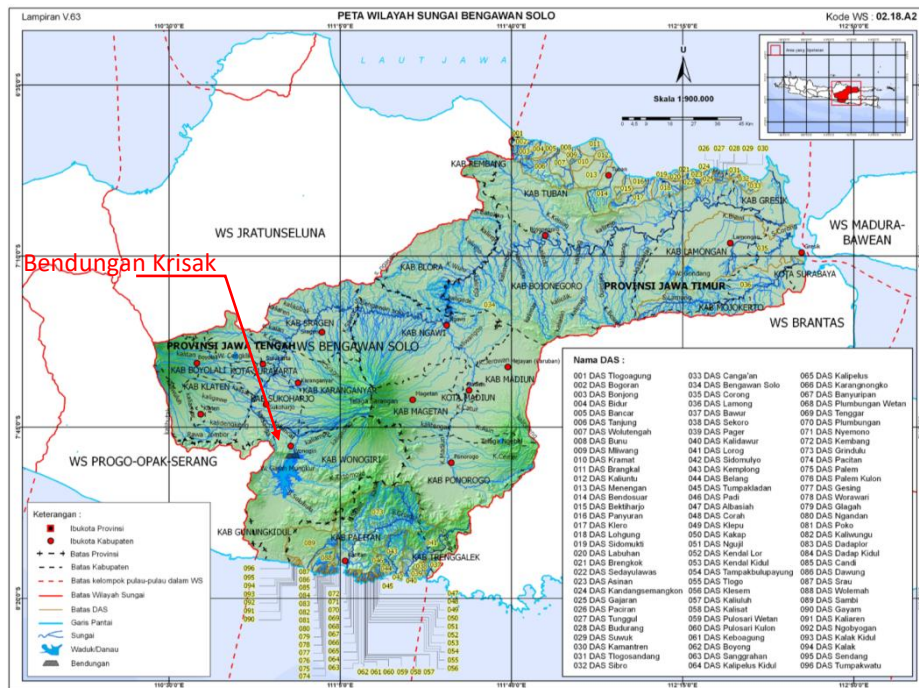
Negara Indonesia merupakan suatu negara yang memiliki potensi sumber daya air yang besar untuk dapat dikembangkan dan dimanfaatkan. Pemanfaatan sumber daya air di Indonesia salah satunya ialah dibangunnya bangunan air berupa bendungan dan waduk.

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. Keamanan bendungan berdasarkan Permen PUPR RI NO 27/PRT/M/2015 menyatakan bahwa keamanan bendungan ditujukan untuk melindungi bendungan dari kegagalan bendungan dan melindungi jiwa, harta, serta prasarana umum yang berada di wilayah yang terpengaruh oleh potensi bahaya akibat kegagalan bendungan. Konsep keamanan bendungan terdiri atas keamanan struktur yang berhubungan dengan desain dan konstruksi layak teknis, pemantauan pemeliharaan dan operasional yang berhubungan dengan pemeriksaan atau inspeksi, perbaikan dan rehabilitasi, dan kesiapsiagaan tindak darurat yang berhubungan dengan siap menghadapi terburuknya kondisi yang terjadi.

Bendungan Krisak adalah tipe urugan tanah homogen dari jenis tanah Lempungan. Tinggi bendungan 15 m dari dasar sungai dengan panjang puncak 350 m dan lebar puncak 5 m pada el. +115,00 m termasuk parapet. Bendungan Krisak mempunyai volume efektif 2,29 juta m<sup>3</sup> dan volume mati 0.049 juta m<sup>3</sup> dengan luas tampungan waduk pada elevasi muka air normal sebesar 45,78 Ha, rencana pemanfaatan untuk irigasi sebesar 340 Ha. Bendungan Krisak dibangun pada zaman kependudukan Belanda pada tahun 1943. Fungsi dibangunnya bendungan ini adalah untuk memenuhi kebutuhan air irigasi di wilayah Kabupaten Wonogiri pada



umumnya dan Kecamatan Selogiri pada khususnya. Hingga kini Bendungan Krisak ini masih dapat berfungsi dengan baik, meskipun mengalami penurunan kemampuan dalam memenuhi kebutuhan air irigasi (Konsultan Perencana, 2020).



**Gambar 1. 1 Lokasi Bendungan Krisak Pada WS Bengawan Solo**

(Sumber : Konsultan Perencana, 2020)

Bendungan Krisak memiliki umur bendungan yang sudah cukup lama, hingga kini ini masih dapat berfungsi dengan baik, meskipun mengalami penurunan kemampuan dalam memenuhi kebutuhan air irigasi. Perlu dilakukan evaluasi keamanan struktur tubuh bendungan yang berfokus pada evaluasi secara rembesan dan stabilitas lereng tubuh bendungan.

## 1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana rembesan dan stabilitas pada Bendungan Krisak pada kondisi muka air banjir berdasarkan analisis menggunakan program GeoStudio 2012 dengan menggunakan Beban Gempa berdasarkan Peta Gempa 2017 ?

2. Bagaimana rembesan dan stabilitas pada Bendungan Krisak pada kondisi muka air normal berdasarkan analisis menggunakan program GeoStudio 2012 dengan menggunakan Beban Gempa berdasarkan Peta Gempa 2017 ?
3. Bagaimana rembesan dan stabilitas pada Bendungan Krisak pada kondisi muka air minimum berdasarkan analisis menggunakan program GeoStudio 2012 dengan menggunakan Beban Gempa berdasarkan Peta Gempa 2017 ?
4. Bagaimana stabilitas pada Bendungan Krisak pada kondisi surut cepat berdasarkan analisis menggunakan program GeoStudio 2012 dengan menggunakan Beban Gempa berdasarkan Peta Gempa 2017 ?

### **1.3. Tujuan Penelitian**

1. Mengetahui rembesan dan stabilitas pada Bendungan Krisak pada kondisi muka air banjir berdasarkan analisis menggunakan program GeoStudio 2012 dengan menggunakan Beban Gempa berdasarkan Peta Gempa 2017.
2. Mengetahui rembesan dan stabilitas pada Bendungan Krisak pada kondisi muka air normal berdasarkan analisis menggunakan program GeoStudio 2012 dengan menggunakan Beban Gempa berdasarkan Peta Gempa 2017.
3. Mengetahui rembesan dan stabilitas pada Bendungan Krisak pada kondisi muka air minimum berdasarkan analisis menggunakan program GeoStudio 2012 dengan menggunakan Beban Gempa berdasarkan Peta Gempa 2017.
4. Mengetahui stabilitas pada Bendungan Krisak pada kondisi surut cepat berdasarkan analisis menggunakan program GeoStudio 2012 dengan menggunakan Beban Gempa berdasarkan Peta Gempa 2017.

### **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 geoteknik terutama pada bangunan bendungan.

### **1.5. Batasan Penelitian**

1. Bangunan Bendungan yang ditinjau yaitu Bendungan Krisak, Kabupaten Wonogiri , Provinsi Jawa Tengah.
2. Evaluasi struktur berfokus pada rembesan dan stabilitas lereng tubuh bendungan.
3. Data yang digunakan pada penelitian kali ini menggunakan data sekunder, sehingga tidak ada turun ke lapangan.
4. Analisis stabilitas dilakukan bendungan dengan program *SLOPE/W* dengan metode Fellenius
5. Garis freatik rembesan tidak berdasarkan piezometer di lapangan melainkan output dari SEEP/W.
6. Beban gempa yang digunakan adalah gempa statik dengan menggunakan peta gempa 2017.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Tinjauan Umum**

Pada BAB sebelumnya telah dibahas mengenai latar belakang, tujuan penelitian, manfaat penelitian serta batasan masalah dari tugas akhir yang akan dilakukan kali ini. 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.

Idealnya tinjauan pustaka penelitian adalah yang mencakup evaluasi dan kutipan bidang yang diteliti, hubungan hasil karya yang ditinjau dengan penelitian itu sendiri, baik secara langsung maupun tidak langsung. Tinjauan pustaka juga memuat perbedaan dari pustaka yang ditinjau.

#### **2.2. Penelitian Sebelumnya**

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.

##### **2.1.1. Analisis Stabilitas Lereng**

Putra (2016) pada penelitiannya mengenai analisis stabilitas lereng pada Bendungan Titab menyimpulkan bahwa hasil analisis stabilitas lereng bendungan Titab dengan pemasangan geotekstil ditinjau dalam 3 kondisi dan 3 metode diantaranya pada saat bendungan baru selesai dibangun (*immediately after completion*) didapatkan nilai SF dengan metode Fellenius = 1,38 ; metode Bishop = 1,43 ; metode Wedge = 1,48. Pada saat air waduk penuh (*reservoir full*) nilai SF dengan metode Fellenius = 1,27 ; metode Bishop = 1,31 ; Wedge = 1,38 dan pada

saat air waduk mengalami penurunan secara tiba-tiba (*rapid drawdown*) nilai SF dengan metode Fellinius = 1,32 , Bishop = 1,38 ,Wedge = 1,41. Pada penggunaan geotekstil memiliki geotekstil tipe/ukuran D17 dan D15 pada bendungan Titab memiliki manfaat yaitu sebagai separator yaitu sebagai pemisah antara dua jenis lapisan tanah yang berbeda granulasinya, tanpa mencegah sirkulasi air. Pada Bendungan Titab memisahkan material inti dan material random, sebagai filter dan drainase yaitu untuk mencegah migrasi partikel-partikel dari tanah atau lumpur bersama aliran air dan peningkatan angka keamanan kestabilan lereng dibandingkan dengan tanpa geotekstil. Sedangkan terhadap rembesan geotekstil memiliki manfaat memperpendek arah aliran rembesan air pada tubuh bendung dan tidak sampai ke lereng bagian hilir , karena memperkecil rembesan maka juga memperkecil berat volume ( $\gamma_{sat}$ ), semakin kecil  $\gamma_{sat}$  maka semakin stabil sebuah lereng dengan demikian maka lereng bagian *upstream* bendungan Titab yang menggunakan Geotekstil ukuran D17 dan D15 sebagai filter dan drainase ini berada pada kondisi stabilitas lereng yang aman.

Fata (2018) dalam penelitiannya analisis stabilitas lereng Bendungan Sutami berdasarkan peta gempa 2017 menyimpulkan bahwa hubungan instrumentasi *settlement* dan analisis *seepage water table* dengan kondisi gempa menyatakan hasil yang aman dari standar yang ada, meskipun terdapat beberapa hal perlu perhatian guna menjaga keamanan tubuh bendungan. Stabilitas lereng bendungan Sutami dianalisis berdasarkan peta gempa 2017 menyatakan hasil pada kondisi tanpa gempa memberikan hasil 97,7778 % Aman. Kondisi *Operating Basic Earthquake (OBE)* kala ulang 100 tahun memberikan hasil 81,111 % Aman. Kondisi *Operating Basic Earthquake (OBE)* kala ulang 200 tahun memberikan hasil 55,5556 % Aman. Kondisi *Maximum Design Earthquake (MDE)* kala ulang 10.000 tahun memberikan hasil 100 % Tidak Aman ( $FK \leq 1$ ). Berdasarkan Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa menyatakan jika faktor keamanan  $\leq 1$  perlu dilanjutkan dengan analisis deformasi permanen yang menggunakan cara *Makdisi & Seed* dengan syarat deformasi tidak melebihi 50% dari tinggi jagaan.

Tinggi jagaan Bendungan Sutami dihitung dari Muka Air Normal (NWL) sebesar 6,5 m. Hasil perhitungan deformasi permanen menunjukkan nilai sebesar  $2,5 \text{ m} < 3,25 \text{ m}$ , maka dinyatakan aman. Estimasi penurunan puncak bendungan menggunakan Metode *Swaisgood* memberikan nilai penurunan maksimum sebesar  $1,6 \text{ m} < 2,5 \text{ m} < 3,25 \text{ m}$ , sehingga disimpulkan masih aman dari kondisi tersebut. Batas aman kala ulang gempa dianalisa dengan membandingkan data gempa historis dari USGS (*United States Geological Survey*) dengan magnitude diatas 5 rentang waktu 20 tahun dari tahun 1998 – 2018 dan nilai percepatan gempa terkoreksi dari Peta Gempa didapatkan hasil percepatan gempa sebesar 0,25 g yang menunjukkan nilai skala V MMI dengan magnitude sebesar 4,3. Percepatan gempa 0,25 g tersebut masuk dalam peta gempa 2017 kala ulang 500 tahun dengan anggapan bahwa pada kala ulang dibawah 10.000 tahun adalah *Operating Basics Earthquake* (OBE). Rekomendasi bila bendungan dalam keadaan tidak stabil yaitu apabila deformasi permanen *Makdisi Seed* tidak aman dilanjutkan dengan respon dinamik. Apabila masih tidak aman dihitung alihan tetap dengan cara *Newmark*, dan apabila tetap tidak aman maka ubah geometri dan mengulang analisa stabilitas dari awal. Tindakan pencegahan dapat dilakukan dengan mengeringkan genangan air di permukaan, menutup/ meratakan lekukan, dan atau mengendalikan air permukaan, tindakan penanggulangan sementara dengan mencegah masuknya air permukaan dengan evaluasi sistem drainase, mengalirkan genangan air serta menutup retakan yang ada dan optimalisasi pola operasi dengan memperhatikan stabilitas lereng berupa penyediaan tampungan ketika terjadi banjir dan saat waduk kering atau surut.

Bentara (2021) Pada penelitiannya mengenai Analisis Rembesan Dan Stabilitas Bendungan Dawuhan Dalam penelitian ini dilakukan analisis menggunakan Metode Casagrande secara manual dan dibantu perangkat lunak GeoStudio 2012 Seep/W untuk mengetahui besar debit rembesan pada Bendungan Dawuhan. Selanjutnya menganalisis stabilitas lereng bendungan menggunakan Metode Fellenius yang dibantu dengan perangkat lunak GeoStudio 2012 Slope/W. Debit rembesan Bendungan Dawuhan dalam kondisi aman karena nilai paling kritis pada kondisi



muka air banjir sebesar  $4,3541 \times 10^{-2}$  m<sup>3</sup>/det secara manual dan hasil Seep/W sebesar  $7,2181 \times 10^{-2}$  m<sup>3</sup>/det. Hasil tersebut telah memenuhi syarat mengikuti Pedoman Grouting Untuk Bendungan Departemen Pekerjaan Umum-SDA dengan 1% dari debit inflow sebesar 0.075 m<sup>3</sup>/det. Bendungan Dawuhan aman terhadap piping dengan syarat SF 3 s/d 4. Pada saat kondisi muka air banjir dengan nilai SF sebesar 4,3431 pada saat kondisi muka air normal dengan SF 7,2174 dan saat kondisi air minimum dalam kondisi aman dengan nilai SF 9,7423. Stabilitas lereng tubuh Bendungan Dawuhan dalam kondisi aman sesuai dengan SNI 8064:2016 (Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Urugan). Kondisi paling kritis yaitu rapid drawdown (surut cepat). Pada kondisi tanpa gempa nilai paling kritis sebesar  $2,568 > 1,5$  (Aman). Pada kondisi gempa OBE sebesar  $2,191 > 1,2$  (Aman). Pada kondisi gempa MDE sebesar  $1,419 > 1$  (Aman).

Setiawan (2021) Pada penelitiannya mengenai Analisis kemanan struktur Bendungan Gonggang dengan Beban Gempa Dinamik. Bendungan Gonggang memiliki banyaknya permasalahan terkait struktur keamanan dan keadaan sekitar Bendungan Gonggang yang berada di zona gempa tinggi. Perlu dilakukan evaluasi keamanan secara dinamik dengan mempertimbangkan kejadian gempa yang terjadi di daerah sekitar Bendungan Gonggang. Daerah Bendungan Gonggang tersusun oleh batuan produk gunung api Lawu tua pada satuan batuan Tufa Jobolarangan. Secara morfologi perbukitan curam menempati lereng waduk bagian kiri dan daerah hilir. Batuan yang tersingkap disekitar bendungan adalah breksi gunung api, tuf lapili, dan endapan sungai tua. Timbunan inti termasuk memiliki kembang susut yang tinggi sehingga dapat disimpulkan keretakan tanah yang terjadi diakibatkan oleh sifat-sifat tanahnya itu sendiri. Bendungan Gonggang tergolong bendungan kelas risiko IV (Ekstrim) sehingga untuk desain bendungan untuk gempa OBE menggunakan tahun kala ulang 100 tahun sedangkan untuk gempa MDE menggunakan kala ulang gempa 10.000 tahun. Nilai percepatan gempa di batuan hasil analisis dengan metode PSHA diperoleh sebesar 0,1309g untuk kala ulang 100 tahun dan 0,5441g untuk kala ulang 10.000 tahun. Nilai yang dihasilkan mendekati dengan hasil penelitian oleh Pusgen



2017 di Peta Gempa 2017. Nilai percepatan gempa setelah dilakukan perambatan ke permukaan dengan menggunakan DEEPSOIL V7 mengalami peningkatan diaman pada kala ulang 100 tahun nilai PGA sebesar sebesar 0,216g dan pada kala ulang 10.000 tahun sebesar 0,896g. Peningkatan ini disebut dengan faktor amplifikasi. Faktor ini dapat berubah sesuai dengan kondisi tanah lokasi setempat. Status keamanan struktur terhadap kegagalan rembesan dalam keadaan tidak aman karena tidak memenuhi syarat SF sebesar 4. Hal ini melihat hasil analisis graiden hidraulik memiliki nilai SF sebesar 1,556 pada kondisi MAB; 1,671 pada kondisi MAN dan 4,717 pada kondisi MAM. Berdasarkan hasil debit rembesan dalam keadaan aman, namun hal ini tidak bisa dijadikan acuan dalam keamanan struktur bendungan terhadap rembesan karena debit rembesan dijadikan acuan dalam pola operasi bendungan. Status keamanan struktur lereng tubuh bendungan dengan menggunakan analisis statik dalam kondisi tidak aman karena nilai faktor keamanan pada keadaan paling kritis sebesar 0.485 kondisi surut cepat. Hasil ini tidak memenuhi syarat dalam SNI 8064 : 2012 yaitu tidak kurang dari 1 ( $SF > 1$ ), sehingga analisis perlu dilanjutkan pada tahap analisis dinamik guna mengetahui respon dinamik pada tubuh bendungan yang akan mempengaruhi deformasi pada tubuh Bendungan Gonggang. Hasil analisis respon dinamik yang mempengaruhi deformasi pada tubuh bendungan dalam keadaan aman. Hal ini dapat dilihat dari nilai deformasi horizontal yang terjadi sebesar 0,41 m sehingga dalam status aman karena tidak melebihi  $\frac{1}{2}$  tebal filter vertikal dan deformasi vertikal sebesar 0,19 dalam status aman karena tidak melebihi  $\frac{1}{2}$  tinggi jagaan. Dari hasil penelitian ini disimpulkan bahwa Keamanan Bendungan Gonggang dalam tinjauan struktur dalam kondisi tidak aman karena pada tinjauan keamanan rembesan dala kondisi tidak aman.

### **2.1.2. Analisis Rembesan**

Saidilliah (2021) Pada penelitiannya mengenai Analisis Rembesan Dan Stabilitas Bendungan Saradan 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.

Sandi (2021) Pada penelitiannya mengenai Analisis Rembesan Dan Stabilitas Bendungan Pondok . Pada penelitian ini melakukan analisis stabilitas tubuh bendungan dengan menggunakan metode Bishop dan juga rembesan yang mungkin terjadi dengan menggunakan pendekatan metode Cassagrande. Dan juga dilakukan pengaruh beban gempa OBE dan MDE dalam analisis ini. Penelitian ini dilakukan dengan membandingkan nilai dari software Geostudio dengan nilai dari perhitungan manual yang dilakukan oleh peneliti. Hasil dari permodelan dengan menggunakan Geostudio 2007 pada penelitian ini didapatkan stabilitas pada kondisi muka air banjir dalam keadaan aman, selanjutnya pada kondisi muka air normal stabilitas bendungan dalam keadaan aman, kondisi muka air banjir stabilitas bendungan dalam keadaan aman, dan pada kondisi muka air rapid drawdown stabilitas bendungan juga dalam keadaan aman. Dari semua kondisi muka air didapatkan bahwa bendungan dalam keadaan aman. Dari perhitungan stabilitas manual dengan menggunakan metode

Bishop pada kondisi muka air normal didapatkan juga bendungan dalam kondisi yang aman. Sedangkan untuk rembesan bendungan disetiap kondisinya didapatkan bahwa tubuh bendungan aman terhadap rembesan, dikarenakan nilai rembesan setiap kondisi muka airnya berada dibawah syarat maksimum remebesan sebesar 0,177 m<sup>3</sup>/detik, maka bendungan aman dari permasalahan piping.

### **2.3. Keaslian Penelitian**

Ilmu teknik bendungan dan rekayasa kegempaan sudah semakin maju dengan banyaknya penelitian yang dilakukan pada bendungan dengan tinjauan yang bermacam macam. Pada penenlitan sebelumnya dilakukan pada bendungan berbeda diantaranya bendungan tipe urugan homogen dan zonal. Ada ebberapa metode yang digunakna dalam analsiis stabilitas lereng diantaranya metode fellenius dan bishop.

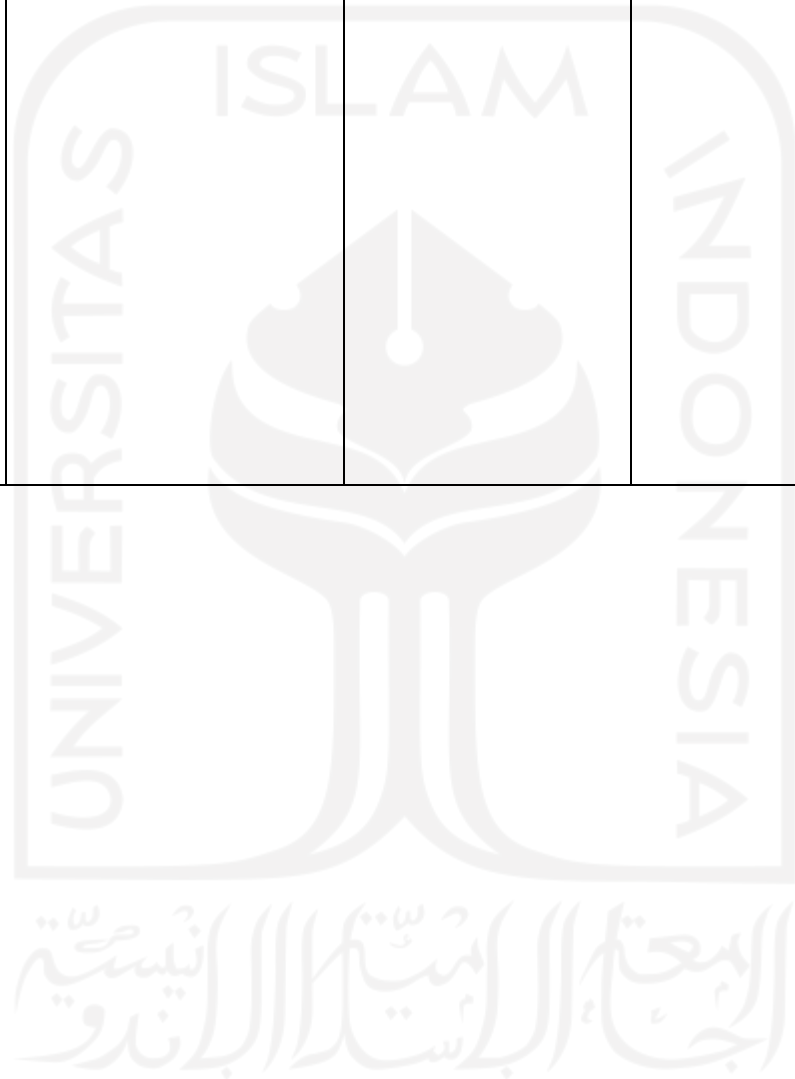
Pada penelitian ini dilakukan pada Bendungan Krisak dengan metode analisis stabitas lereng menggunakan metode Janbu menggunakan Geostudio 2012. Keaslian penelitian ini secara ringkas dapat dilihat pada Tabel 2.1 Sebagai berikut.

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Peneliti Tahun	Putra 2016	Fata 2018	Saidillah 2021	Bentara 2021	Sandi 2021	Setiawan 2021	Setiyawati 2022
<b>Judul Penelitian</b>	Analisis Stabilitas Lereng Pada Bendungan Titab	Analisis Stabilitas Lereng Bendungan Sutami Berdasarkan Peta Gempa 2017.	Analisis Rembesan Dan Stabilitas Bendungan Saradan	Analisis Stabilitas Tubuh Bendungan Dawuhan	Analisis Stabilitas Tubuh Bendungan Menggunakan Metode Bishop Dan Perhitungan Rembesan Dengan Pendekatan Metode Cassagrande (Studi Kasus: Bendungan Pondok, Kabupaten Ngawi, Jawa Timur)	Analisis Dinamik Keamanan Struktur Bendungan (Studi Kasus Bendungan Gonggang Kabupaten Magetann Jawa Timur)	Evaluasi Keamanan Struktur Bendungan Krisak.
<b>Tujuan Penelitian</b>	Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat keamanan stabilitas lereng dengan adanya pemasangan geoeekstil.	Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kondisi terkini dan stabilitas lereng bendungan Sutami sehingga didapatkan batas aman kala ulang gempa dan rekomendasi.	Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kemanan struktur tubuh bendungan berupa stabilitas lereng dan rembesan sesuai dengan peraturan yang berlaku.	Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kemanan struktur tubuh bendungan berupa stabilitas lereng dan rembesan sesuai dengan peraturan yang berlaku.	Diharapkan pada penelitian ini dapat mendapatkan nilai safety factor dari tubuh bendungan yang dianalisis dengan beberapa keadaan menggunakan metode Bishop dan juga menggunakan aplikasi software Geostudio	Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat keamanan bendungan dari segi struktur yang terdiri atas rembesan, stabilitas lereng dan deformasi tubuh bendung dengan mempertimbangkan nilai percepatan batuan di daerah sekitar.	Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kemanan struktur tubuh bendungan berupa stabilitas lereng dan rembesan sesuai dengan peraturan yang berlaku.
<b>Metode Penelitian</b>	Pada penelitian ini dilakukan dengan beberapa metode, diantaranya adalah metode irisan Bishop, metode Fellinius, dan Metode Janbu.	Analisis instrumentasi <i>seepage water table</i> melalui <i>observation well/hole</i> . Analisis stabilitas dilakukan dengan metode keseimbangan dan Analisis dinamik dilanjutkan menggunakan metode Makdisi-Seed dengan percepatan gempa rata – rata dalam menghitung deformasi pada timbunan berdasarkan pada prosedur Copra (1966) dan <i>Sliding Block Analysis</i> .	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 ( <i>Operating Basis Earthquake</i> ) dan MDE ( <i>Maximum Design Earthquake</i> ).	Dalam penelitian ini dilakukan analisis menggunakan Metode Casagrande secara manual dan dibantu perangkat lunak GeoStudio 2012 Seep/W untuk mengetahui besar debit rembesan pada Bendungan Dawuhan. Selanjutnya menganalisis stabilitas lereng bendungan menggunakan Metode Fellenius yang dibantu dengan perangkat lunak GeoStudio 2012 Slope/W.	Dalam menganalisis nilaiabilitas bendungan digunakan metode Bishop dan juga aplikasi Geostudio.	Penelitian ini dilakukan melakukan kajian geologi teknik pada material timbunan , kemudian dilakukan analisis rembesan dengan bantuan <i>Software SEEP/W</i> , Analisis stabilitas lereng dilakukan dengan bantuan <i>software SLOPE/W</i> dan analisis deformasi dilakukan dengan bantuan <i>software SIGWA/W</i> dan <i>QUAKE/W</i> . Untuk mencari nilai percepatan tanah dilakukan dengan analisis PSHA digunakan bantuan <i>software Seismik Risk Model</i>	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 ( <i>Operating Basis Earthquake</i> ) dan MDE ( <i>Maximum Design Earthquake</i> ).
<b>Hasil Penelitian</b>	Hasil analisis stabilitas lereng bendungan Titab dengan pemasangan geotekstil ditinjau dalam 3 kondisi dan 3 metode diantaranya pada saat bendungan baru selesai dibangun ( <i>immediately after completion</i> ) didapatkan nilai SF dengan metode Fellinius = 1,38 ; metode Bishop = 1,43 ; metode Wedge = 1,48. Pada saat air waduk penuh ( <i>reservoir</i>	Kondisi terkini Bendungan Sutami ditinjau dari hubungan instrumentasi <i>Settlement</i> dan Analisis <i>Seepage Water Table</i> dengan kondisi gempa menyatakan hasil yang aman dari standar keberterimaan yang ada, meskipun terdapat beberapa hal perlu perhatian guna menjaga keamanan tubuh bendungan. Stabilitas lereng Bendungan Sutami dianalisis	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),	Debit rembesan Bendungan Dawuhan dalam kondisi aman karena nilai paling kritis pada kondisi muka air banjir sebesar $4,3541 \times 10^{-2}$ m <sup>3</sup> /det secara manual dan hasil Seep/W sebesar $7,2181 \times 10^{-2}$ m <sup>3</sup> /det. Hasil tersebut telah memenuhi syarat	Dari perhitungan stabilitas manual dengan menggunakan metode Bishop pada kondisi muka air normal diapatkan juga bendungan dalam kondisi yang aman. Sedangkan untuk rembesan bendungan disetiap kondisinya didapatkan bahwa tubuh bendungan aman terhadap	Bendungan Gonggang tergolong bendungan kelas risiko IV (Ekstrim) sehingga untuk desain bendungan untuk gempa OBE menggunakan tahun kala ulang 100 tahun sedangkan untuk gempa MDE menggunakan kala ulang gempa 10.000 tahun. Nilai percepatan gempa di batuan hasil analisis dengan metode	-

Peneliti Tahun	Putra 2016	Fata 2018	Saidillah 2021	Bentara 2021	Sandi 2021	Setiawan 2021	Setiyawati 2022
	<p><i>full</i>) nilai SF dengan metode Fellinius = 1,27 ; metode Bishop = 1,31 ; Wedge = 1,38 dan pada saat air waduk mengalami penurunan secara tiba-tiba (<i>rapid draw down</i>) nilai SF dengan metode Fellinius = 1,32 ; Bishop = 1,38 ; Wedge = 1,41. Pada penggunaan geotekstil memiliki geotekstil tipe/ukuran D17 dan D15 pada bendungan Titab memiliki manfaat yaitu sebagai separator yaitu sebagai pemisah antara dua jenis lapisan tanah yang berbeda granulasinya, tanpa mencegah sirkulasi air. Pada bendungan Titab memisahkan material inti dan material random, sebagai filter dan drainase yaitu untuk mencegah migrasi partikel-partikel dari tanah atau lumpur bersama aliran air dan meningkatkan angka keamanan kestabilan lereng dibandingkan dengan tanpa geotekstil. Sedangkan terhadap rembesan geotekstil memiliki manfaat memperpendek arah aliran rembesan air pada tubuh bendung dan tidak sampai ke lereng bagian hilir , karena memperkecil rembesan maka juga memperkecil berat volume (<math>\gamma_{sat}</math>), semakin kecil <math>\gamma_{sat}</math> maka semakin stabil sebuah lereng dengan demikian maka lereng bagian upstream bendungan Titab yang menggunakan Geotekstil ukuran D17 dan D15 sebagai filter dan drainase ini berada pada kondisi stabilitas lereng yang aman.</p>	<p>berdasarkan Peta Gempa 2017 menyatakan hasil : Kondisi Tanpa Gempa memberikan hasil 97,7778 % Aman Kondisi Operating Basic Earthquake (OBE) kala ulang 100 tahun memberikan hasil 81,111 % Aman. Kondisi <i>Operating Basic Earthquake</i> (OBE) kala ulang 200 tahun memberikan hasil 55,5556 % Aman. Kondisi <i>Maximum Design Earthquake</i> (MDE) kala ulang 10.000 tahun memberikan hasil 100 % Tidak Aman (<math>FK \leq 1</math>)</p>	<p>dengan gempa MDE 1,407 &gt; 1 (Aman), selanjutnya pada kondisi muka air minimum tanpa gempa 2,541 &gt; 1,5 (Aman), dengan gempa OBE 2,031 &gt; 1,2 (Aman), dengan gempa MDE 1,245 &gt; 1 (Aman), selanjutnya pada kondisi surut cepat tanpa gempa 1,899 &gt; 1,3 (Aman), dengan gempa OBE 1,541 &gt; 1,1 (Aman), dengan gempa MDE 0,973 &gt; 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.</p>	<p>mengikuti Pedoman Grouting Untuk Bendungan Departemen Pekerjaan Umum-SDA dengan 1% dari debit inflow sebesar 0.075 m<sup>3</sup>/det. Bendungan Dawuhan aman terhadap piping dengan syarat SF 3 s/d 4. Pada saat kondisi muka air banjir dengan nilai SF sebesar 4,3431 pada saat kondisi muka air normal dengan SF 7,2174 dan saat kondisi air minimum dalam kondisi aman dengan nilai SF 9,7423. Stabilitas lereng tubuh Bendungan Dawuhan dalam kondisi aman sesuai dengan SNI 8064:2016 (Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Urugan). Kondisi paling kritis yaitu rapid drawdown (surut cepat). Pada kondisi tanpa gempa nilai paling kritis sebesar 2,568 &gt; 1,5 (Aman). Pada kondisi gempa OBE sebesar 2,191 &gt; 1,2 (Aman). Pada kondisi gempa MDE sebesar 1,419 &gt; 1 (Aman).</p>	<p>rembesan, dikarenakan nilai rembesan setiap kondisi muka airnya berada dibawah syarat maksimum remebesan sebesar 0,177 m<sup>3</sup>/detik, maka bendungan aman dari permasalahan piping.</p>	<p>PSHA diperoleh sebesar 0,1309g untuk kala ulang 100 tahun dan 0,5441g unuk kala ulang 10.000 tahun. Nilai yang dihasilkan mendekati dengan hasil penelitian oleh Pusgen 2017 di Peta Gempa 2017. Nilai percepatan gempa setelah dilakukan perambatan ke permukaan dengan menggunakan DEEPSOIL V7 mengalami peningkatan diaman pada kala ulang 100 tahun niali PGA sebesar sebesar 0,216g dan pada kala ulang 10.000 tahun sebesar 0,896g. Peningkatan ini disebut dengan faktor amplifikasi. Faktor ini dapat berubah sesuai dengan kondisi tanah lokasi setempat. Status keamanan struktur terhadap kegagalan rembesan dalam keadaan tidak aman karena tidak memenuhi syarat SF sebesar 4. Hal ini melihat hasil analisis graiden hidraulik memiliki nilai SF sebesar 1,556 pada kondisi MAB; 1,671 pada kondisi MAN dan 4,717 pada kondisi MAM. Berdasarkan hasil debit rembesan dalam keadaan aman, namun hal ini tidak bisa dijadikan acuan dalam keamanan struktur bendungan terhadap rembesan karena debit rembesan dijadikan acuan dalam pola operasi bendungan. Status keamanan struktur lereng tubuh bendungan dengan menggunakan analisis statik dalam kondisi tidak aman karena nilai faktor keamanan pada keadaan paling kritis sebesar 0,485 kondisi surut cepat. Hasil ini tidak memenuhi syarat dalam SNI 8064 : 2012 yaitu tidak kurang dari 1 (SF&gt;1), sehingga analisis perlu dilanjutkan pada tahap analisis dinamik guna mengetahui respon dinamik pada tubuh</p>	

Peneliti Tahun	Putra 2016	Fata 2018	Saidillah 2021	Bentara 2021	Sandi 2021	Setiawan 2021	Setiyawati 2022
						<p>bendungan yang akan mempengaruhi deformasi pada tubuh Bendungan Gonggang. Hasil analisis respon dinamik yang mempengaruhi deformasi pada tubuh bendungan dalam keadaan aman. Hal ini dapat dilihat dari nilai deformasi horizontal yang terjadi sebesar 0,41 m sehingga dalam status aman karena tidak melebihi <math>\frac{1}{2}</math> tebal filter vertikal dan deformasi vertikal sebesar 0,19 dalam status aman karena tidak melebihi <math>\frac{1}{2}</math> tinggi jagaan. Dari hasil penelitian ini disimpulkan bahwa Keamanan Bendungan Gonggang dalam tinjauan struktur dalam kondisi tidak aman karena pada tinjauan keamanan rembesan dala kondisi tidak aman.</p>	





## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1. Tanah**

##### **3.3.1. Tinjauan Umum**

Das (1995) menyatakan bahwa tanah secara umum didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat atau butiran mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel-partikel padat tersebut. Tanah merupakan salah satu hal yang wajib diperhatikan karena keadaan tanah di lapangan pada umumnya tidak homogen. Tanah memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda-beda. Pada saat tanah difungsikan sebagai pendukung pondasi bangunan, tanah tersebut harus memiliki kondisi tanah yang stabil, sehingga apabila ada sifat tanah yang kurang mampu mendukung bangunan harus diperbaiki terlebih dahulu agar mencapai daya dukung tanah yang diperlukan.

##### **3.3.2. Tanah Lempung**

Lempung didefinisikan sebagai golongan partikel yang mempunyai ukuran  $< 0,002$  mm (Das, 1995). Hal ini disebabkan karena terjadinya proses kimiawi yang mengubah susunan mineral batuan asalnya yang disebabkan oleh air yang mengandung asam atau alkali, oksigen, dan karbondioksida. Di tinjau dari segi mineralnya lempung didefinisikan sebagai tanah yang menghasilkan sifat-sifat plastis pada tanah yang menghasilkan sifat-sifat plastis pada tanah. Partikel-partikel itu merupakan sumber utama kohesi didalam tanah yang kohesif. Tanah lempung merupakan tanah yang berukuran mikroskopis sampai dengan sub mikroskopis yang berasal dari pelapukan unsur-unsur kimiawi penyusun batuan, tanah lempung sangat keras dalam keadaan kering dan bersifat plastis pada kadar air sedang. Pada kadar air lebih tinggi lempung berifat lengket (kohesif) dan



sangat lunak. Untuk itu tanah tersebut perlu di stabilkan dengan cara dipadatkan atau menambahkan bahan lain yang sifatnya dapat mengutkan struktur tanah.

Tanah lempung adalah tanah yang berasal dari pelapukan tanah akibat reaksi kimia menghasilkan susunan kelompok partikel berukuran koloid dengan diameter butiran halus < 0,002 mm. Partikel lempung berbentuk seperti lembaran yang mempunyai permukaan khusus (Hardiyatmo, 2002)

### 3.3.3. Sifat Fisik Tanah

Tanah dalam keadaan alami atau asli memiliki beberapa sifat-sifat dasar. Sifat-sifat dasar tersebut berupa sifat fisik yang berhubungan dengan tampilan dan ciri-ciri umum dari tanah. Sifat fisik tanah berguna untuk mengetahui jenis tanah tersebut.

#### 1. Ukuran partikel

Ukuran partikel yang dimiliki tanah berbeda-beda tergantung dari jenis tanah tersebut. Ukuran butiran ditentukan dengan melakukan uji saringan dengan saringan yang disusun dengan lubang yang terbesar berada paling atas dan semakin

kecil pada susunan dibawahnya. Berdasarkan hasil uji saringan tersebut maka dapat

diketahui jenis tanah. Metode yang dapat digunakan untuk mengetahui jenis tanah berdasarkan tekstur adalah metode grafik segitiga yang dikembangkan oleh *Mississippi River Comission*.

#### 2. Kadar Air

Kadar air (W) di definisikan sebagai perbandingan antara berat air dan berat butiran padat atau isi tanah dari volume tanah yang diselidiki. Kadar air dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (3.1)$$

dengan :

$$W = \text{Kadar air (\%)}$$

$$W_w = \text{Berat air}$$

$$W_s = \text{Berat butiran padat}$$

### 3. Porositas

Porositas ( $n$ ) adalah perbandingan antara volume rongga dengan volume total. Porositas dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (3.2)$$

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (3.3)$$

dengan :

$n$  = Porositas

$V_v$  = Volume rongga

$V$  = Volume total

$e$  = Angka Pori

### 4. Angka Pori

Angka pori ( $e$ ) didefinisikan sebagai perbandingan antara volume rongga dengan volume butiran. Angka pori dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$n = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.4)$$

$$n = \frac{n}{1-n} \quad (3.5)$$

dengan :

$e$  = Angka Pori

$V_v$  = Volume rongga

$V_s$  = Volume butiran padat

$n$  = Porositas

### 5. Berat volume basah ( $\gamma_b$ )

Berat volume basah ( $\gamma_b$ ) didefinisikan perbandingan berat butiran tanah termasuk air dan udara dengan volume total tanah. Berat volume basah dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$\gamma_b = \frac{W}{V} \quad (3.6)$$

$$\gamma_b = \frac{G_s \cdot \gamma_w \cdot (1+w)}{1+e} \quad (3.7)$$

dengan :

$\gamma_b$  = Berat volume Basah

$W$  = Berat butiran tanah termasuk air dan udara

$V$  = Volume total

$G_s$  = Berat jenis

$\gamma_w$  = Berat air

$e$  = angka pori

#### 6. Berat Volume Butiran Padat ( $\gamma_s$ )

Berat Volume Butiran Padat ( $\gamma_s$ ) didefinisikan perbandingan antara berat butiran padat dengan volume butiran padat. Berat Volume Butiran Padat ( $\gamma_s$ ) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (3.8)$$

dengan :

$\gamma_s$  = Berat volume padat

$W_s$  = Berat butiran padat

$V_s$  = Volume Padat.

#### 7. Berat Jenis/Specific Gravity ( $G_s$ )

Berat Jenis/Specific Gravity ( $G_s$ ) didefinisikan sebagai perbandingan antara volume padat dengan volume air pada temperatur 4°C. Berat Jenis/Specific Gravity ( $G_s$ ) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (3.9)$$

dengan :

$G_s$  = Berat Jenis/Specific Gravity

$\gamma_s$  = Berat volume padat

$\gamma_w$  = Volume butiran padat

#### 8. Berat Volume Kering ( $\gamma_d$ )

Berat Volume Kering ( $\gamma_d$ ) didefinisikan perbandingan antara berat butiran dengan volume total. Berat Volume Kering ( $\gamma_d$ ) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (3.10)$$

$$\gamma_d = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1+e} \quad (3.11)$$

dengan :

$\gamma_d$  = Berat volume kering

$W$  = Berat butiran tanah termasuk air dan udara

$V$  = Volume total

$G_s$  = Berat jenis

$\gamma_w$  = Berat air

$e$  = angka pori

9. Berat Volume Jenuh Air ( $\gamma_{sat}$ )

Berat Volume Kering ( $\gamma_{sat}$ ) didefinisikan berat volume air ketika derajat kejenuhannya 100% . Berat volume jenuh air ( $\gamma_{sat}$ ) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_w \cdot (G_s + e)}{1 + e} \quad (3.12)$$

dengan :

$\gamma_s$  = Berat volume jenuh air

$G_s$  = Berat jenis

$\gamma_w$  = Berat air

$e$  = angka pori

10. Berat Volume Apung ( $\gamma'$ )

Berat volume apung ( $\gamma'$ ) didefinisikan sebagai keadaan tanah terendam dengan air. Berat volume apung ( $\gamma'$ ) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

dengan :

$$\gamma' = \frac{(G_s - 1) \cdot \gamma_w}{1 + e} \quad (3.13)$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (3.14)$$

dengan :

$\gamma'$  = Berat volume apung

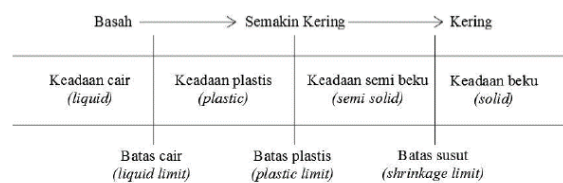
$G_s$  = Berat jenis

$\gamma_w$  = Berat air

$e$  = angka pori

### 3.3.4. Batas-batas Atterberg

Batas kadar air tanah dari satu keadaan berikutnya disebut sebagai batas-batas kekentalan/konsistensi. Batas-batas konsistensi tanah tersebut adalah batas cair (LL), batas plastis (PL), batas susut (SL). Batas-batas ini dikenal juga dengan batas-batas *Atterberg*. Batas kadar air tanah dapat dilihat pada Gambar 3.2.



**Gambar 3. 1 Batas-batas Atterberg**

(Sumber : Hardiyatmo, 2002)

#### 1. Batas Cair (Liquid Limit)

Batas Cair (LL) adalah kadar air batas dimana suatu tanah berubah dan keadaan cair menjadi keadaan plastis.

$$LL = W_N \left(\frac{N}{25}\right)^{tg.\beta} \quad (3. 15)$$

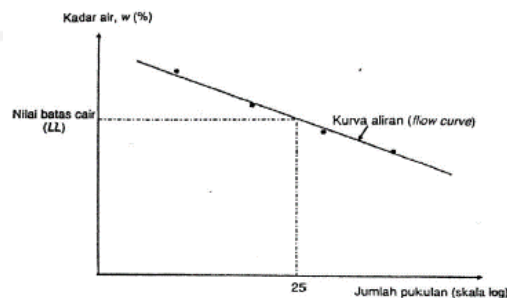
dengan :

LL = Batas Cair

$N$  = Jumlah pukulan pada kadar air

$W_N$  = Kadar air saat tanah tertutup

$tg.\beta = 0,121$  (Tapi  $\beta$  tidak sama dengan 0,121 untuk semua jenis tanah)



**Gambar 3. 2 Kurva Untuk Penentuan Batas Cair Lempung**

(Sumber : Hardiyatmo, 2002)

## 2. Batas Plastis (Plastic Limit)

Menurut Hardiyatmo (2002) batas plastis (PL) didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dan semi padat, yaitu persentase kadar air dimana tanah dengan diameter silinder 3,2 mm mulai retak-retak ketika digulung.

## 3. Batas Susut (Shrinkage Limit)

Menurut Hardiyatmo (2002) batas susut (SL) didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah semi padat dan padat, yaitu persentase kadar air dimana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanah. Persamaan batas susut dapat dihyung dengan persamaan berikut.

$$SL = \left[ \frac{(m_1 - m_2)}{m_2} - \frac{(v_1 - v_2) \cdot \gamma_w}{m_2} \right] \times 100\% \quad (3.16)$$

dengan :

SL = Batas Susut

m<sub>1</sub> = Berat tanah basah dalam cawan percobaan (g)

m<sub>2</sub> = Berat tanah kering oven (g)

v<sub>1</sub> = Berat tanah basah dalam cawan (cm<sup>3</sup>)

v<sub>2</sub> = volume tanah kering oven (cm<sup>3</sup>)

γ<sub>w</sub> = Berat volume air (gr/cm<sup>3</sup>)

## 4. Indeks Plastis (Palsticity Index)

Menurut Hardiyatmo (2002) indeks Plastisitas (Plasticity Index) adalah perbedaan antara batas cair dan batas plastis suatu tanah. Indeks Plastisitas (PI) dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$PI = LL - PL \quad (3.17)$$

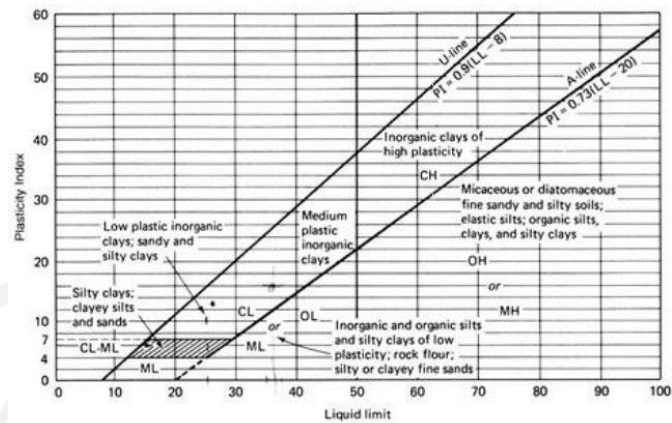
dengan :

PI = Indeks Plastisitas

LL = Batas cair

PL = Batas plastis

Hubungan antar indeks plastis dengan batas cair mentukan kandung pada tanah lempung. Berikut ini grafik hubungan antara indeks plastis dengan batas cair dapat dilihat pada Gambar 3.4 sebagai berikut.



**Gambar 3. 3 Grafik Casagrade**

(Sumber : Hardiyatmo, 2002)

### 3.3.5. Sifat Mekanika Tanah

Sifat mekanik tanah adalah sifat-sifat tanah yang mengalami perubahan setelah diberikan gaya-gaya tambahan atau pembebanan dengan tujuan untuk memperbaiki sifat-sifat tanah.

#### 1. Sudut Geser Dalam

Sudut geser dalam beserta kohesi merupakan parameter yang menentukan kekuatan tanah terhadap deformasi akibat tegangan yang bekerja pada tanah. Nilai dari sudut geser dalam diperoleh dari *engineering properties* tanah, yaitu dengan *triaxial test* dan *direct shear test*. Nilai sudut geser dalam berdasarkan jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 3.4 sebagai berikut.

**Tabel 3. 1 Nilai Sudut Geser Dalam Berdasarkan Jenis Tanah**

Jenis Tanah	Sudut Geser Dalam ( $\phi$ )
Kerikil Berpasir	35°-40°
Kerikil Kerakal	35°-40°
Pasir Padat	35°-40°
Pasir Lepas	30°
Lempung Kelanauan	25°-30°
Lempung	20°-25°

(Sumber : Das, 1995)

## 2. Kuat Geser

Menurut Craig (1989) dalam Ahmad (2014) mengatakan bahwa kohesi merupakan ukuran dari daya tarik antara partikel-partikel tanah kohesif yang disimbolkan dengan  $c$ . Kohesi bersama dengan sudut geser dalam merupakan parameter dari kekuatan geser pada tegangan efektif. Dengan demikian keruntuhan akan terjadi pada titik yang mengalami kritis yang disebabkan oleh kombinasi antara tegangan geser dan tegangan normal efektif .

### 3.3.6. Permeabilitas Tanah

Permeabilitas merupakan kemampuan tanah dalam meloloskan air. Permeabilitas tanah dipengaruhi oleh sifat porositas tanah dan kemantapan agregat-agregat tanah. Semakin banyak air yang masuk ke dalam tanah, akan semakin banyak volume air yang ada di dalam tanah dan akan membuat kebutuhan tanaman terhadap air tercukupi, serta membuat kondisi tanah menjadi lembab.

## 3.2. Bendungan

### 3.4.1. Pengertian Bendungan

Menurut Kartasapoetra (1991) dalam Ahmad (2014) mengatakan bahwa bendungan merupakan bangunan air yang dibangun secara melintang sungai, sedemikian rupa agar permukaan air sungai di sekitarnya naik sampai ketinggian tertentu, sehingga air sungai tadi dapat dialirkan melalui pintu sadap ke saluran-saluran pembagi kemudian hingga ke lahan-lahan pertanian Suatu bendungan dapat dipandang dari beberapa segi yang masing-masing menghasilkan tipe bendungan yang berbeda-beda.

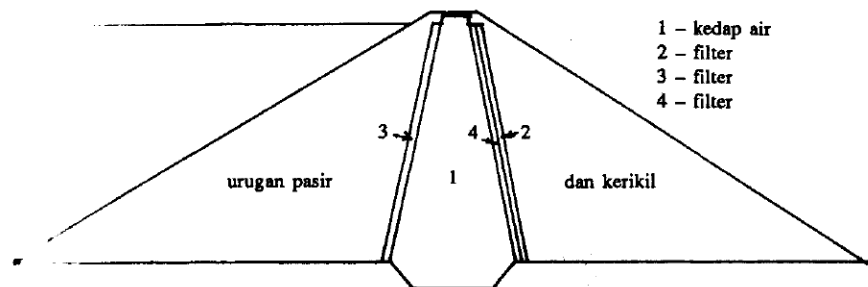
### 3.4.2. Klasifikasi Bendungan

Bendungan besar (*Large Dams*) menurut ICOLD (*The International Commission on Large Dams*) dalam Soediby (2003) merupakan bendungan dengan tingginya lebih dari 15 m diukur dari bagian terbawa pondasi sampai puncak bendungan, selain berdasarkan tinggi bendungan besar di dasari atas



beberapa kriteria diantaranya panjang puncak bendungan tidak kurang dari 500 m, kapasitas tampungan tidak kurang dari 1 juta m<sup>3</sup>, debit banjir maksimum yang diperhitungkan tidak kurang dari 2000 m<sup>3</sup>/detik, bendungan menghadapi kesulitan-kesulitan khusus pada pondasinya (*hand specially difficult foundation problems*), dan bendungan didesain tidak seperti biasanya (*unusual design*).

Bendungan urugan pasir dan kerikil (*gravel pebble fill dams*) dalam Soedibyo (2003) merupakan bendungan urugan yang lebih dari setengah volumenya terdiri atas pasir dan kerikil dengan lapis kedap air yang terdapat di dalam tubuh bendungan. Yang dimaksudkan dengan pasir dan kerikil di sini adalah pasir (*sand*) maupun dengan kerikil (*gravel*) atau pasir saja ataupun kerikil saja. Batu bulat yang berasal dari sungai (*cobble*) dapat dipakai. Kerikil dan batu bulat diambil dari sumber pengembalian bahan bangunan (*borrow pit*) dan biasanya mudah tercampur dengan pasir. Campuran dari tanah dan lumpur dibatasi sehingga tingginya 5%. Apabila kadarnya lebih dari 5% harus dicuci lebih dahulu untuk mencegah agar penurunan bendungan yang terjadi besar. Berikut ini salah satu contoh tipe bendungan urugan pasir dan kerikil dengan lapis kedap air tegak dapat dilihat pada Gambar 3.6 sebagai berikut.



**Gambar 3. 4 Tipe Bendungan Bendungan Urugan Pasir Dan Kerikil Dengan Lapis Kedap Air Tegak**

(Sumber : Sudibyo, 2003)

### 3.4.3. Fungsi Bendungan

Menurut Widhi (2007) dalam Ahmad (2014) bendungan memiliki beberapa fungsi diantaranya sebagai berikut.

1. Irigasi

Pada saat musim hujan, air hujan yang turun di daerah tangkapan air sebagian besar akan ditampung sehingga pada musim kemarau air yang tertampung tersebut dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, antara lain sebagai irigasi lahan pertanian.

## 2. Penyediaan Air Baku

Waduk selain sebagai sumber untuk pengairan persawahan juga dimanfaatkan sebagai bahan baku air minum dimana daerah perkotaan sangat langka dengan air bersih.

## 3. Sebagai PLTA

Dalam menjalankan fungsinya sebagai PLTA, waduk dikelola untuk mendapatkan kapasitas listrik yang dibutuhkan. Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) adalah suatu sistem pembangkit listrik yang biasanya terintegrasi dalam bendungan dengan memanfaatkan energi mekanis aliran air untuk memutar turbin, diubah menjadi energi listrik melalui generator.

## 4. Pengendali Banjir

Sungai dengan debit air yang besar jika tidak dikendalikan dengan cermat maka akan membahayakan masyarakat sekitar sungai, maka permasalahan tersebut dapat dijadikan sebagai latar belakang dari pembangunan waduk. Pada saat musim hujan, air hujan yang turun di daerah tangkapan air sebagian besar akan mengalir ke sungai-sungai yang pada akhirnya akan mengalir ke hilir sungai yang tidak jarang mengakibatkan banjir di kawasan hilir sungai tersebut, apabila kapasitas tampung bagian hilir sungai tidak memadai. Dengan dibangunnya bendungan-bendungan di bagian hulu sungai maka kemungkinan terjadinya banjir pada musim hujan dapat dikurangi dan pada musim kemarau air yang tertampung tersebut dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, antara lain untuk pembangkit listrik tenaga air, untuk irigasi lahan pertanian, untuk perikanan, untuk pariwisata dan lain-lain.

## 5. Perikanan

Penggantian mata pencaharian para penduduk yang tanahnya digunakan untuk pembuatan waduk dari mata pencaharian sebelumnya beralih ke dunia

perikanan dengan memanfaatkan waduk untuk peternakan ikan di dalam jaring-jaring apung atau karamba-karamba.

#### 6. Pariwisata dan Olahraga Air

Dengan pemandangan yang indah waduk juga dapat dimanfaatkan sebagai tempat rekreasi dan selain tempat rekreasi juga dimanfaatkan sebagai tempat olahraga air maupun sebagai tempat latihan para atlet olahraga air.

### 3.4.4. Konsep Keamanan Bendungan

#### 1. Umum

Bendungan dianggap aman apabila pembangunan dan pengelolaan bendungan telah memenuhi konsepsi dan kaidah-kaidah keamanan bendungan yang tertuang didalam peraturan, standar, pedoman dan manual (NSPM) yang berlaku. Pada gambar di bawah disajikan bagan Konsepsi Keamanan Bendungan yang memiliki 3 pilar sebagai berikut.



Gambar 3. 5 Konsep Keamanan Bendungan

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

#### a. Pilar I : Keamanan struktur

Bendungan harus didesain dan dikonstruksi sesuai perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, kokoh dan aman untuk segala kondisi dan kombinasi beban kerja serta aman dioperasikan pada segala kondisi operasi.

#### b. Pilar II : Pemantauan dan pemeliharaan

Bendungan harus selalu dipantau sehingga dapat diketahui sedini mungkin setiap problem yg sedang berkembang sebelum menjadi ancaman yang

nyata dan selalu dipelihara dengan baik sehingga selalu siap dioperasikan pada segala kondisi operasi.

c. Pilar III : Kesiapsiagaan Tanggap Darurat

Pemilik/Pengelola bendungan harus selalu siap siaga menghadapi kondisi darurat sampai kondisi terburuk dari bendungan yang dimilikinya /dikelolanya. Penanganan pada kondisi darurat tidak dibenarkan dilakukan dengan cara "improvisasi" / coba-coba tetapi harus berdasarkan RENCANA TINDAK DARURAT yang telah disiapkan secara matang.

Upaya-upaya yang dilakukan pada Pilar I, adalah merupakan upaya untuk mengurangi risiko kegagalan bendungan, sedang upaya-upaya pada Pilar II dan Pilar III adalah merupakan upaya untuk menjaga agar risiko yang ada/yang tersisa tidak berkembang menjadi lebih buruk.

2. Keamanan Struktur

Berdasarkan Zainudin (2010) bendungan secara keseluruhan, termasuk tubuh bendungan, pondasi, abutmen (bukit tumpuan) dan lereng sekeliling waduk, harus kokoh dan aman pada semua kondisi dan kombinasi beban yang bekerja serta aman dioperasikan pada segala kondisi operasi, yaitu operasi normal, operasi luar biasa, operasi darurat maupun operasi banjir bagi bendungan pengendali banjir.

Keamanan Struktur (Pilar I) akan dapat dicapai apabila desain dan konstruksi bendungan dilaksanakan dengan benar sesuai Norma, Standar, Pedoman, dan Manual, dengan memperhatikan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi sehingga desain dan konstruksi layak teknis. Upaya-upaya yang dilakukan pada Pilar I, adalah merupakan upaya untuk mengurangi risiko kegagalan bendungan, sehingga risiko kegagalan dapat ditekan sampai dengan tingkat yang wajar sesuai kriteria yang berlaku.

Agar desain suatu bendungan layak teknis, kegiatan survai dan investigasi sejak tahap pemilihan lokasi bendungan, harus dilakukan dengan cermat dengan mematuhi standard NSPM yang berlaku. Demikian pula dalam pembuatan kriteria desain untuk penyiapan desain pendahuluan (basic design) maupun untuk desain rinci (detil design) serta penyiapan desainnya harus mematuhi NSPM .

Untuk memastikan bahwa penyiapan desain telah dilaksanakan sesuai NSPM, desain bendungan harus dikaji oleh Balai Bendungan dan Komisi Keamanan Bendungan serta mendapat persetujuan desain dari Menteri PU.

Konstruksi bendungan baru boleh dilaksanakan setelah desain bendungan mendapat persetujuan dan dikeluarkan izin pelaksanaan konstruksi dari Menteri PU. Konstruksi bendungan, harus dilaksanakan sesuai dengan desain yang telah mendapat persetujuan dari Menteri PU.

Selama tahap operasi, keamanan struktur harus tetap dipertahankan melalui kegiatan pemantauan dan pemeliharaan. Keamanan struktur suatu bendungan (yang telah terbangun) harus dievaluasi ulang sekurang-kurangnya sekali dalam kurun waktu 5 tahun bersamaan dengan kegiatan pemeriksaan besar.

Ilmu mengenai bendungan adalah merupakan kombinasi antara ilmu (*scient*) dan seni (*art*) yang berkembang terus. Meningkatnya risiko keruntuhan bendungan telah mendorong tumbuhnya ilmu pengetahuan bendungan. Hal-hal yang kemarin biasa dijalankan, untuk esok hari mungkin sudah tidak sesuai lagi (*out of date*). Suatu teknologi yang dulu dianggap baik, kadang-kadang setelah diterapkan dan dipelajari oleh para pakar, ternyata memiliki kelemahan-kelemahan sehingga perlu penyempurnaan dengan teknologi baru. Desain bendungan dituntut untuk mengikuti perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi terbaru tersebut. Sebagai contoh pemakaian “colar” pada “conduit” semula dianggap sebagai metode yang tepat untuk mencegah terjadinya konsentrasi aliran rembesan pada permukaan luar pipa conduit. Saat ini, hal tersebut tidak dianjurkan lagi karena dari berbagai pengalaman pemakaian colar justru akan mengganggu proses pemadatan timbunan. Akibatnya hasil pemadatan timbunan disekitar conduit kurang baik, sehingga justeru terjadi kebocoran.

a. Aman terhadap kegagalan struktural dan operasional

Berdasarkan Zainudin (2010) desain bendungan harus memperhitungkan semua kondisi dan kombinasi beban yang bekerja yang terdiri dari beban normal maupun beban luar biasa dan beban ekstrim. dengan faktor keamanan yang cukup sesuai standar yang berlaku. Bendungan secara keseluruhan, termasuk tubuh bendungan, pondasi, abutmen (bukit tumpuan)

dan lereng sekeliling waduk, harus selalu stabil dalam kondisi apapun termasuk kondisi gempa bumi dan semua kondisi operasi. Faktor keamanan minimal, memenuhi persyaratan SNI.

Untuk bendungan urugan, angka/faktor keamanan minimal yang dipersyaratkan disajikan dalam tabel dibawah. Analisis stabilitas paling tidak harus dilakukan pada kondisi sebagai berikut.

- Selesainya pembangunan.
- Rembesan tetap.
- Pengoperasian waduk : surut cepat dari elevasi muka air normal ke minimum; dari elevasi muka air maksimum ke minimum.
- Beban luar biasa : adanya kebuntuan pada sistem drainasi, surut cepat karena penggunaan air melebihi kebutuhan dan surut cepat karena gawat darurat.

Hal lain yang perlu diperhatikan untuk mencegah kegagalan bendungan karena kegagalan operasi, antara lain

- Desain pilar, pintu dan mungkin dinding pelimpah perlu memperhitungkan vibrasi yang mungkin terjadi akibat aliran air.
- Harus tersedia sarana: jalan, jembatan atau tangga menuju lokasi pengoperasian, yang dapat digunakan dengan aman pada kondisi normal maupun kondisi luar biasa/darurat.
- Pada tempat-tempat pengoperasian yang tertutup, harus dilengkapi dengan ventilasi atau pengaturan udara dan penerangan yang memadai.

#### b. Aman terhadap kegagalan hidrolik

Berdasarkan Zainudin (2010) sebagian besar bendungan yang runtuh, disebabkan oleh peluapan air lewat puncak tubuh bendungan (*overtopping*). Kejadian ini biasanya terjadi karena beberapa penyebab diantaranya sebagai berikut.

- Kapasitas pelimpah yang tidak mencukupi.
- Pintu pelimpah gagal dioperasikan karena faktor manusia atau faktor teknis.

- Longsoran besar yang tiba-tiba masuk ke waduk yang menimbulkan gelombang besar.
- Karena tinggi jagaan (*freeboard*) yang tidak cukup.

c. Aman terhadap Kegagalan Rembesan

Berdasarkan Zainudin (2010) pada bendungan urugan, timbulnya rembesan merupakan kondisi yang tidak dapat dihindari, akan tetapi rembesan yang berlebihan dapat berpotensi membahayakan bendungan. Rembesan dapat terjadi pada tubuh bendungan, pondasi, tumpuan bendungan maupun bukit-bukit tipis disekeliling waduk. Rembesan yang berlebihan dapat memicu terjadinya erosi buluh yang semakin lama semakin berkembang dan semakin luas, yang kemudian disusul dengan terjadinya longsoran dan keruntuhan bendungan. Secara alami rembesan juga cenderung membawa unsur-unsur yang penting bagi keutuhan bendungan. Secara garis besar kegagalan bendungan akibat rembesan dapat terjadi karena beberapa hal sebagai berikut.

- Gradien keluaran (*exit gradient*) yang terlalu tinggi (dapat mengakibatkan didih pasir/sandboil, likuifaksi statis, erosi buluh),
- Tekanan air pori yang terlalu tinggi (dapat mengakibatkan ketidakstabilan, deformasi dan tekanan angkat yang berlebihan).
- Gradien internal pada zona inti yang terlalu tinggi (dapat mengakibatkan perpindahan butiran halus dari zona inti ke zona dihilirnya, atau dari zona inti/urugan tanah ke fondasi pasir kerikil)
- Debit rembesan berlebihan yang terjadi yang disertai dengan membawa material dapat menimbulkan aliran buluh yang berbahaya bagi stabilitas bendungan.
- Tekanan angkat (*uplift*) yang terlalu tinggi (dapat mengganggu stabilitas bangunan dan lapisan tanah fondasi kedap air yang berada di atasnya).
- Lereng yang terlalu curam sehingga permukaan aliran rembesan muncul pada permukaan lereng, menimbulkan daerah basah pada lereng, meningkatkan berat jenis material lereng, menurunkan kuat gesernya dan pada akhirnya lereng akan mudah longsor



- Retak desikasi, terjadi akibat berkurangnya kadar air di dalam zona inti jauh di bawah kadar air pelaksanaan, atau jika kadar air turun di bawah batas plastis. Akibatnya saat waduk diisi dapat terjadi bocoran yang serius lewat retakan dan terjadinya erosi, yang akhirnya mengakibatkan keruntuhan bendungan, terutama pada bendungan yang tinggi.

Untuk menghindari terjadinya kegagalan rembesan, bendungan harus didesain aman terhadap kondisi diatas dengan faktor keamanan yang cukup sesuai pedoman yang berlaku. Material inti dipilih yang yang tidak bersifat erosif, zona inti harus memiliki ketebalan yang cukup dengan pelaksanaan pemadatan yang baik, inti dilindungi dengan filter dan drainasi yang memadai, hindari lereng hilir bendungan yang terlalu curam, dll. Walaupun dari hasil perhitungan desain tidak diperlukan adanya filter namun karena didalam pelaksanaan akan sangat sulit menghasilkan uruga yang betul-betul homogen, hendaknya pada bendungan urugan selalu dilengkapi filter dan drainasi dengan kapasitas yang cukup.

#### **3.4.5. Rembesan Tubuh Bendungan**

Berdasarkan Hardiyatmo (2002) air pada keadaan statis didalam tanah, akan mengakibatkan tekanan hidrostatis yang arahnya ke atas (*uplift*). Akan tetapi, jika air mengalir lewat lapisan tanah, aliran air akan mendesak partikel tanah sebesar tekanan rembesan hidrodinamis yang bekerja menurut alirannya. Besarnya tekanan rembesan akan merupakan fungsi dari gradien hidrolis ( $i$ ). Tekanan hidrodinamis mempunyai pengaruh yang besar pada stabilitas tanah. Tergantung pada arah aliran, tekanan hidrodinamis dapat mempengaruhi berat volume tanah.

Ketika tekanan rembesan ke atas, yang terjadi dalam tanah sama dengan gradien ( $i_c$ ), maka tanah berada pada kondisi mengapung. Keadaan semacam ini juga dapat berakibat terangkutnya butir-butir tanah halus, sehingga terjadi pipa-pipa didalam tanah yang disebut Piping. Pipa-pipa yang membentuk rongga-rongga dapat mengakibatkan fondasi bangunan mengalami penurunan, hingga mengganggu stabilitas bangunan (Hardiyatmo, 2002).



Piping dapat terjadi di tanggul, pondasi, ataupun tanggul pada pondasi. Piping yang terjadi di tanggul bendungan disebabkan oleh tiga proses yaitu erosi belakang, suffusion (terbawanya butiran tanah yang diakibatkan oleh rembesan) dan kebocoran yang terkonsentrasi. Erosi belakang terbentuk dari proses dimana erosi diawali dari pintu keluar titik rembesan dan progresif. Hasil erosi belakang membentuk suatu bagian yang terus menerus atau biasa disebut dengan piping.

Semakin cepat muka air turun ke bawah maka faktor keamanan (FK) lereng akan semakin berkurang. Hal ini menunjukkan kecepatan penarikan permukaan air adalah faktor utama yang mempengaruhi stabilitas lereng. Semakin besar kecepatan penarikan level air maka akan semakin mengurangi stabilitas lereng.

Tekanan Hidrodinamis dapat mengubah keseimbangan lapisan tanah. Pada keadaan seimbang, besarnya gaya yang bekerja ke bawah ( $W = \gamma'$ ), sama dengan gaya rembesan persamaan berikut ini.

$$D = \gamma_w \cdot i_c \quad (3.18)$$

$$W \downarrow - D \downarrow = 0 \quad (3.19)$$

$$W = \gamma' = (1-n) (G_s-1) \cdot \gamma_w \quad (3.20)$$

$$\gamma' = \frac{(G_s-1) \cdot \gamma_w}{1+e}$$

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (3.21)$$

$$\frac{(G_s-1) \cdot \gamma_w}{1+e} - \gamma_w \cdot i_c = 0 \quad (3.22)$$

$$i_c = \frac{(G_s-1)}{1+e} \quad (3.23)$$

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (3.24)$$

$$SF = \frac{i_c}{i} \quad (3.25)$$

dengan :

$\gamma'$  = Berat volume apung

$G_s$  = Berat jenis

$\gamma_w$  = Berat air

$e$  = Angka pori

$i_c$  = Gradien Hidrolik kritik

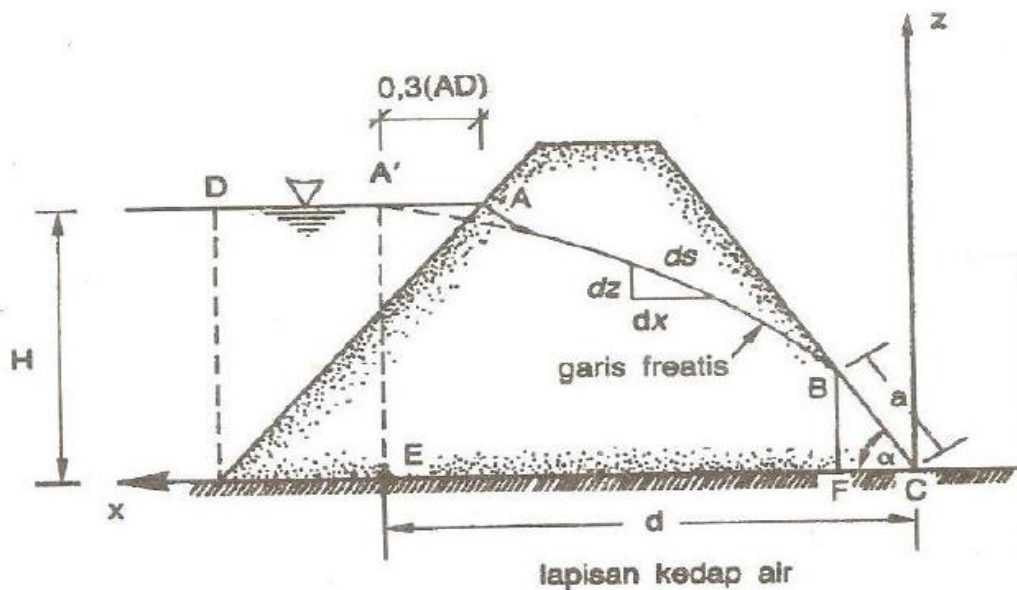
$i$  = Gradien keluar maksimum

$\Delta h$  = Perbedaan tinggi tekan pada titik peresapan air di lereng hulu dengan titik keluarannya di bagian hilir (m)

$\Delta L$  = Panjang aliran filtrasi (m)

Berdasarkan Harza (1935) dalam Hardiyatmo (2002) menyatakan bahwa nilai faktor keamanan bangunan air berupa perbandingan antara nilai gradien hidrolik kritis dengan gradien keluar maksimum harus lebih besar dari 3 sampai dengan 4 ( $\frac{i_c}{i_e} > 3$  s/d 4).

A. Cassagrande (1937) memberikan cara untuk menghitung rembesan lewat tubuh bendungan yang berasal dari pengujian model. Pemodelan metode Casagrande dapat dilihat pada Gambar sebagai berikut.



**Gambar 3.6 Hitungan Rembesan Cara Casagrande**

(Sumber : Hardiyatmo, 2006)

Besarnya debit rembesan dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut.

$$q = k_a \sin^2 \alpha \quad (3.26)$$

$$\alpha = \sqrt{(d^2 + H^2)} - \sqrt{(d^2 - H^2 \cot^2 \alpha)} \quad (3.27)$$

Dengan :

$q$  = debit rembesan ( $m^3 / det$ )

$k$  = koefisien permeabilitas ( $m/det$ )

$\alpha$  = sudut hilir tanggul

$d$  = jarak horizontal antara E dan C (m)

$a$  = panjang zona basah (m)

$H$  = tinggi muka air (m)

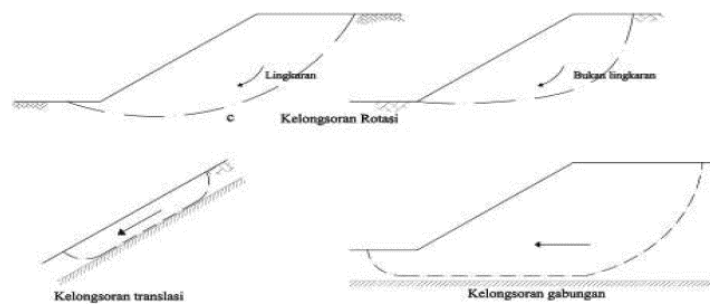
Batas aman rembesan berdasarkan debitnya mengikuti Departemen Pekerjaan Umum-SDA yang mengacu pada batasan yang berlaku di Jepang (*Japanese Institute of Irrigation and Drainage 1988*) nilai angka rembesan yang diperkenankan pada bendungan yaitu sebanyak total rembesan dari waduk yang melewati pondasi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

#### **3.4.6. Stabilitas Lereng Tubuh Bendungan**

##### 1. Pengertian Stabilitas Lereng

Stabilitas atau kemantapan lereng merupakan suatu faktor aman dalam pekerjaan geoteknik, karena menyangkut persoalan keselamatan manusia, dan kelancaran pekerjaan. Selain itu, stabilitas lereng juga merupakan salah satu syarat penting yang harus dipenuhi untuk membangun sebuah konstruksi di suatu bidang lereng.

Pada umumnya ketidakstabilan (*instability*) pada lereng disebabkan oleh gaya-gaya gravitasi dan rembesan (*seepage*), baik itu pada lereng alami (*natural slope*), pada lereng buatan yang dibentuk dengan cara penggalian, atau pada lereng tanggul serta bendungan. Tipe-tipe keruntuhan lereng yang biasa terjadi dapat dilihat pada Gambar 3.8 sebagai berikut.



**Gambar 3. 7 Tipe-Tipe Keruntuhan Lereng**

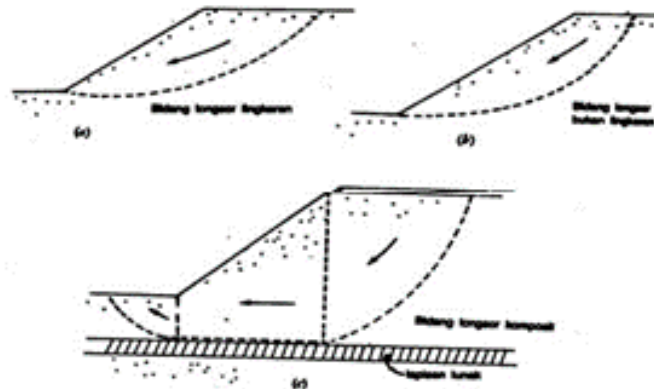
(Sumber : Craig, 1998 dalam Hardiyatmo, 2002)

Dalam kelongsoran rotasi (*rotasional arc*) bentuk permukaan runtuh pada potongannya dapat berupa busur lingkaran (*circular arc*) atau kurva bukan lingkaran. Pada umumnya, kelongsoran lingkaran berhubungan dengan kondisi tanah yang homogen dan kelongsoran bukan lingkaran berhubungan dengan kondisi tidak homogen. Kelongsoran translasi (*translation slip*) dan kelongsoran gabungan (*compound slip*) terjadi bila bentuk permukaan runtuh dipengaruhi oleh adanya kekuatan geser yang berbeda pada lapisan tanah yang berbatasan. Kelongsoran translasi cenderung terjadi bila lapisan tanah yang berbatasan berbeda

pada kedalaman yang relatif dangkal di bawah permukaan lereng, yang permukaan runtuhnya akan berbentuk bidang dan hampir sejajar dengan lereng. Kelongsoran gabungan biasanya terjadi bila lapisan tanah yang berbatasan berada pada kedalaman yang lebih besar, dan permukaan runtuhnya terjadi dari bagian-bagian lengkung dan bidang (Craig, 1989 dalam hardiyatmo, 2002).

## 2. Metode Fellenius

Pengamatan longsoran lereng oleh Collin (1846) dalam Hardiyatmo (2002) menunjukkan bahwa kebanyakan peristiwa longsoran tanah terjadi dengan bentuk bidang longsor yang berupa lengkungan. Keruntuhan lereng dari jenis tanah kohesif banyak terjadi karena bertambahnya kadar air tanah. Sebab terjadinya longsoran adalah karena tidak tersedianya kuat geser tanah yang cukup untuk menahan gerakan tanah longsor ke bawah, pada bidang longsonya dapat dilihat pada Gambar 3.9 sebagai berikut.

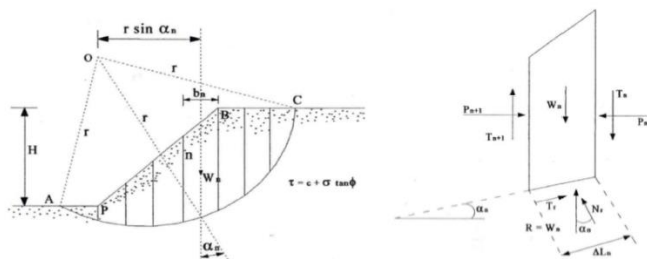


**Gambar 3. 8 Bentuk Bentuk Bidang Longsor**

(Sumber : Hardiyatmo, 2002)

Lengkung bidang longsor dapat berbentuk bidang lingkaran (silinder). spiral logaritmus ataupun kombinasi dari keduanya. Kadang-kadang, dijumpai pula suatu bidang longsor yang tidak berupa kurva menerus akibat perpotongan dari bidang longsor tersebut dengan lapisan tanah keras (seperti: lempung sangat kaku, pasir padat, permukaan batu) atau lapisan yang sangat lunak. Contoh bentuk-bentuk bidang longsor ini diperlihatkan dalam gambar di atas.

Bentuk anggapan bidang longsor berupa lingkaran dimaksudkan untuk mempermudah hitungan analisis stabilitasnya secara matematik, dan dipertimbangkan mendekati bentuk sebenarnya dari bidang longsor yang sering terjadi di alam. Kesalahan analisis stabilitas lereng tidak banyak disebabkan oleh bentuk anggapan bidang longsor, akan tetapi oleh kesalahan dalam penentuan sifat-sifat tanah dan penentuan lokasi bidang longsor kritisnya (Bowle, 1984 dalam Hardiyatmo, 2002) dapat dilihat pada Gambar 3.10 sebagai berikut.



**Gambar 3. 9 Gaya-gaya yang Bekerja Pada Irisan**

(Sumber : Das, 1995)

Analisis stabilitas lereng cara Fellenius (1927) dalam Hardiyatmo (2002) menganggap gaya-gaya yang bekerja pada sisi kanan-kiri dari sembarang irisan mempunyai resultan nol pada arah tegak lurus bidang longsor. Dengan anggapan ini, keseimbangan arah vertikal dan gaya-gaya yang bekerja dengan memperhatikan tekanan air pori. Faktor aman didefinisikan sebagai berikut.

$$F = \frac{\Sigma Mt}{\Sigma Md} \quad (3.28)$$

Lengan momen dari berta massa tanah tiap irisan adalah  $R \cdot \sin q$ , Maka :

$$\Sigma M_d = R \sum_{i=1}^{i=n} W_i \cdot \sin q \quad (3.29)$$

dengan :

$R$  = Jari-jari lingkaran bidang longsor

$n$  = Jumlah irisan

$W$  = Berat massa tanah irisan ke- $i$

$q$  = Sudut yang didefinisikan pada gambar diatas.

Dengan cara yang sama , momen yang menahan tanah akan longsor, dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$\Sigma M_r = R \sum_{i=1}^{i=n} (ca + N \cdot \tan \varphi) \quad (3.30)$$

Sehingga persamaan untuk faktor aman menjadi persamaan sebagai berikut.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (ca + N \cdot \tan \varphi)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \cdot \sin \theta} \quad (3.31)$$

Bila terdapat air pada lereng, tekanan air pori pada bidang longsor tidak menambah momen akibat tanah yang longsor ( $M_d$ ), karena resultan gaya akibat tekanan air pori lewat titik-titik pusat lingkaran. Mensubtitusikan persamaan diatas sehingga memperoleh persamaan sebagai berikut.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} ca + (W_i \cdot \cos \theta - u_i \cdot a_i) \tan \varphi}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \cdot \sin \theta} \quad (3.32)$$

dengan:

$F$  = Faktor aman.

$c$  = Kohesi tanah (kN/m-).

$\varphi$  = dalam tanah ( $^{\circ}$ )

$a_i$  = Panjang lengkung lingkaran pada irisan ke-i (m)

$W_i$  = Berat irisan tanah ke-i (kN) .

$u_i$  = Tekanan air pori pada irisan ke-i (kN/m<sup>2</sup>)

$\theta$  = Sudut yang didefinisikan pada gambar diatas.

Jika terdapat gaya-gaya selain berat tanahnya sendiri ,seperti beban bangunan di atas lereng, maka momen akibat beban ini diperhitungkan sebagai  $M_d$ . Metode Fellinius rnenghasilkan faktor aman yang lebih rendah dari cara hitungan yang lebih teliti. Batas-batas nilai kesalahan dapat mencapai kira-kira 5 sampai 40% tergantung dan faktor aman, sudut pusat lingkaran yang dipilih dan besarnya tekanan aair pori. Walaupun analisis ditinjau dalam tinjauan tegangan total, kesalahan masih merupakan fungsi dari faktor aman dan sudut pusat dari lingkaran (Whitman dan Baily, 1967 dalam Hardiyatmo, 2002). Cara ini telah banyak digunakan dalam praktek, karena cara hitung sederhana dan kesalahan yang terjadi pada sisi yang aman.

### 3. Beban Gempa Pada Bendungan

Perhitungan nilai beban gempa dilakukan dengan mengikuti pedoman kontruksi dan bangunan analisis stabilitas bendungan tipe urugan akibat beban gempa yang dikeluarkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Pd T-14-2004-A). Ada dua tinjauan dalam menentukan beban gempa diantaranya sebagai berikut.

#### a. Gempa dasar operasi (*Operating basis earthquake, OBE*)

Gempa dasar operasi (*Operating basis earthquake, OBE*) ialah gempa dengan batasan guncangan di permukaan tanah pada lokasi studi dengan 50% kemungkinan tidak terlampaui dalam 100 tahun, yang sebaiknya ditentukan secara probabilistik. Bendungan dan bangunan pelengkap serta peralatannya harus tetap berfungsi dengan baik dan mudah diperbaikannya jika terjadi gempa dasar operasi, tetapi tanpa memperhitungkan tinjauan keamanan terhadap kehidupan manusia.

#### b. Gempa desain maksimum (*Maximum design earthquake, MDE*)

Gempa desain maksimum (*Maximum design earthquake*, MDE) ialah gempa yang memberikan guncangan terbesar di lokasi studi yang akan digunakan untuk desain atau analisis. Untuk bendungan yang keruntuhannya akan mengancam kehidupan, gempa desain maksimum sebaiknya diambil pada batas yang sama dengan CMCE, untuk mempertahankan kapasitas pengisian waduk. Jika keruntuhan bendungan tidak mengancam kehidupan, dapat diambil gempa yang lebih kecil dari CMCE sebagai MDE.

#### 4. Pengaruh Tingkat Risiko Bendungan

Penentuan pengaruh tingkat risiko bangunan dilakukan dengan beberapa tinjauan diantaranya klasifikasi kelas risiko dan kriteria beban gempa.

##### a. Klasifikasi Kelas Risiko

Penentuan klasifikasi kelas risiko didapatkan dengan Persamaan dan Tabel 3.5 di bawah ini. Parameter klasifikasi kelas risiko didapatkan berdasarkan data teknis bendungan dianalisis.

$$FR_{\text{total}} = FR_k + FR_t + FR_e + FR_h \quad (3.33)$$

dengan :

$FR_k$  = Faktor risiko kapasitas tampung

$FR_t$  = Faktor risiko tinggi bendungan

$FR_e$  = Faktor risiko kebutuhan evakuasi

$FR_h$  = Faktor risiko tingkat kerusakan

**Tabel 3. 2 Kriteria Faktor Risiko Untuk Evaluasi Keamanan Bendungan**

Faktor Risiko	Angka bobot dalam kurung				
	Ekstrema	Tinggi		Moderat	Rendah
Kapasitas ( $10^6 \text{ m}^3$ ) ( $FR_k$ )	>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 : Pd T-14-2004-A)



### b. Kriteria Beban Gempa

Setelah didapatkan nilai faktor risiko selanjutnya yaitu menentukan kriteria beban gempa dengan menentukan kelas risiko. Parameter penentuan kelas risiko dan kriteria beban gempa dapat dilihat pada Tabel 3.6 sebagai berikut.

**Tabel 3. 3 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 : Pd T-14-2004-A)

**Tabel 3. 4 Kriteria Beban Gempa Untuk Desain Bendungan**

Kelas risiko dengan masa guna	Persyaratan tanpa kerusakan		Persyaratan diperkenankan ada kerusakan tanpa keruntuhan	
	T (thn)	Metode Analisis	T (thn)	Metode analisis
IV N=50-100	100 – 200 ad $\geq$ 0,1 g	Koef Gempa	10.000 (MDE)	Koef. gempa atau dinamik *
III N=50-100	50 – 100 ad $\geq$ 0,1 g	Koef Gempa	5000 (MDE)	Koef. gempa atau dinamik *
II N=50-100	50-100 ad $\geq$ 0,1 g	Koef Gempa	(MDE)	Koef. gempa atau dinamik *
I N=50-100	50-100 ad $\geq$ 0,1 g	Koef Gempa	1000 (MDE)	Koef. gempa atau dinamik *

Catatan :

1) Untuk bendungan besar dengan kondisi geologi setempat yang khusus, Peta Zona Gempa dalam bab V tidak dapat digunakan, dan perlu dilakukan studi gempa tersendiri.

2) Analisis dinamik dapat dilakukan dengan analisis ragam sambutan gempa atau sejarah waktu percepatan gempa.

\*) Penjelasan lebih terperinci periksa tabel 17.

(Sumber : Pd T-14-2004-A)

### 5. Koefisien Gempa

Koefisien gempa ditentukan nilai percepatan gempa maksimum terkoreksi (*peak ground acceleration*, PGA ). Peta Gempa yang digunakan yaitu Peta Gempa 2017 .

$$PGA_M = F_{PGA} \times S_{PGA} \quad (3. 34)$$

dengan :

$PGA_M$  = Percepatan puncak di permukaan tanah

$F_{PGA}$  = Faktor amplikasi untuk PGA

$S_{PGA}$  = Percepatan tanah di permukaan

**Tabel 3. 5 Faktor Amplikasi (FPGA)**

Kelas situs	$S_{PGA}$				
	$PGA \leq 0,1$	$PGA = 0,2$	$PGA = 0,3$	$PGA = 0,4$	$PGA = 0,5$
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)

a. 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 3.34 dan Persamaan 3.35 berikut ini.

$$K_h = \frac{PGA_M}{g} \quad (3.35)$$

$$K = \alpha_1 \times K_h \quad (3.36)$$

dengan :

$PGA_M$  = Percepatan puncak di permukaan tanah

$\alpha_1$  = 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<sup>2</sup>)

b. Cara Koefisien gempa termodifikasi.

Cara koefisien gempa yang telah diuraikan perlu dimodifikasi karena sudah tidak sesuai lagi. Oleh karena itu, digunakan cara dari Jepang “*Seismic Design Guideline for Fill Dam*” dengan koefisien gempa desain  $K_h$ , yang

diperoleh dari persamaan dan koefisien gempa desain pada tubuh bendungan yang merupakan fungsi dari kedalaman, dapat dihitung dengan Persamaan 3.36 sebagai berikut.

$$K_o = \alpha_2 \times K_h \quad (3.37)$$

dengan :

$K_o$  = Koefisien gempa desain terkoreksi di permukaan tanah.

$\alpha_2$  = Koreksi pengaruh jenis struktur, untuk bendungan tipe urugan 0,5.

$K_h$  = Koefisien gempa dasar yang tergantung periode ulang  $T$ .

Dalam analisis stabilitas ini koefisien gempa pada kedalaman  $Y$  dari puncak bendungan berbeda-beda. Untuk analisis stabilitas, peninjauan dilakukan pada  $Y = 0.25H$ ;  $0.50H$ ;  $0.75H$  dan  $H$  ( $H$  ialah tinggi bendungan) dengan menggunakan  $K_h$  pada periode ulang sesuai dengan yang dipersyaratkan. Koefisien gempa rata-rata  $K$  pada  $Y$  yang berbeda-beda dapat dihitung dengan persamaan-persamaan Persamaan 3.37 dan Persamaan 3.38 sebagai berikut.

Untuk  $0 < Y/h \leq 0,4$

$$K = K_o \times \{2,5 - 1,85 \times (Y/h)\} \quad (3.38)$$

Untuk  $0,4 < Y/H \leq 1,0$

$$K = K_o \times \{2,0 - 0,60 \times (Y/h)\} \quad (3.39)$$

**Tabel 3. 6 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	$E_a$	$E_a$	$E_b$	$E_b$
II	$E_a$	$E_a$	$E_b$	$E_b$
III	$E_a$	$E_a$	$E_b$	$E_b$
IV	Tidak ada	Tidak ada	$E_b$	$E_b$
Persyaratan yang diperkenankan ada kerusakan tanpa keruntuhan (MDE)				
I	$E_a$	$E_c$	$E_b$	$E_c$
II	$E_a$	$E_c$	$E_b$	$E_c$
III	$E_a$	$E_c$	$E_b$	$E_c$

IV	Tidak ada	Tidak ada	E <sub>b</sub>	E <sub>c</sub>
Catatan : Ea = analisis menggunakan cara koefisien gempa dengan persamaan (48) dan (49) Eb = analisis menggunakan cara koefisien gempa termodifikasi dengan persamaan (48), (51) dan (52). Ec = analisis dilakukan secara bertahap; dimulai dengan menggunakan cara koefisien gempa termodifikasi, jika faktor keamanan $\leq 1.00$ perlu dilanjutkan dengan analisis deformasi permanen yang menggunakan cara <i>Makdisi-Seed</i> dengan syarat deformasi tidak melebihi 50% dari tinggi jagaan; jika tidak memenuhi syarat perlu dilanjutkan dengan analisis respons dinamik yang menggunakan cara elemen hingga.				

(Sumber : Pd T-14-2004-A)

## 6. Syarat Faktor Keamanan Stabilitas Bendungan

Persyaratan faktor keamanan stabilitas bendungan mengikuti SNI 8064 : 2012 tentang metode analisis stabilitas lereng statik bendungan tipe urugan dan Pedoman kontruksi dan bangunan analisis dinamik bendungan urugan dapat dilihat pada Tabel 3.10 berikut ini.

**Tabel 3. 7 Persyaratan Faktor Minimum Stabilitas Lereng Bendungan**

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 tanpa kerusakan digunakan	1. Efektif	Dari analisis rembesan	1,5	1,2

NO	Kondisi	Kuat Geser	Tekanan Air pori	FK Tanpa Gempa	FK dengan Gempa *
	100% 100f koef gempa desain.				
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. 2.Surut cepat karena penggunaan air melebihi kebutuhan. 3.Surut cepat keperluan darurat.	1.Efektif	Surut cepat dari El.MA maksimum sampai EL. Terendah bangunan pengeluaran. Pengaruh gempa diabaikan.	1,3	
*Catatan : periksa standar tentang Metode Analisis stabilitas dinamik bendungan tipe urugan. *)untuk OBE ; sedangkan **)untuk MDE, $FK \geq 1$					

(Sumber : SNI 8064 : 2012)

### 3.3. Software Geostudio

Geostudio merupakan suatu perangkat lunak dalam bidang desain geoteknik yang berasal dari negara Kanada. Pada fasilitas software ini dapat digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng adalah pada menu SLOPE/W. Suatu perencanaan khusus didalam dunia Teknik sipil menggunakan alat bantu SLOPE/W untuk mendapatkan hasil perhitungan secara mudah dan cepat.

*Geostudio 2012* merupakan perangkat lunak digunakan dalam bidang geoteknik yang dikeluarkan oleh perusahaan asal Kanada yang bernama *GEOSLOPE International Ltd.* Ada beberapa bagian dari geostudio dengan fungsinya yang berbeda.

1. SLOPE/W adalah program yang digunakan untuk analisis stabilitas lereng, baik tanah maupun batuan, termasuk galian dan timbunan. Berikut ini tampilan gambar Slope/W dapat dilihat pada Gambar berikut.



**Gambar 3. 10 Tipe-Tipe Keruntuhan Lereng**

(Sumber : <https://www.geoslope.com/products/geostudio>)

2. SEEP/W adalah program yang digunakan untuk analisis rembesan air. Aplikasi dalam bendungan adalah analisis rembesan yang melewati tubuh dan fondasi bendungan, infiltrasi air lewat drainase dan sumur injeksi. Berikut ini tampilan gambar Seep/W dapat dilihat pada Gambar berikut.



**Gambar 3. 11**

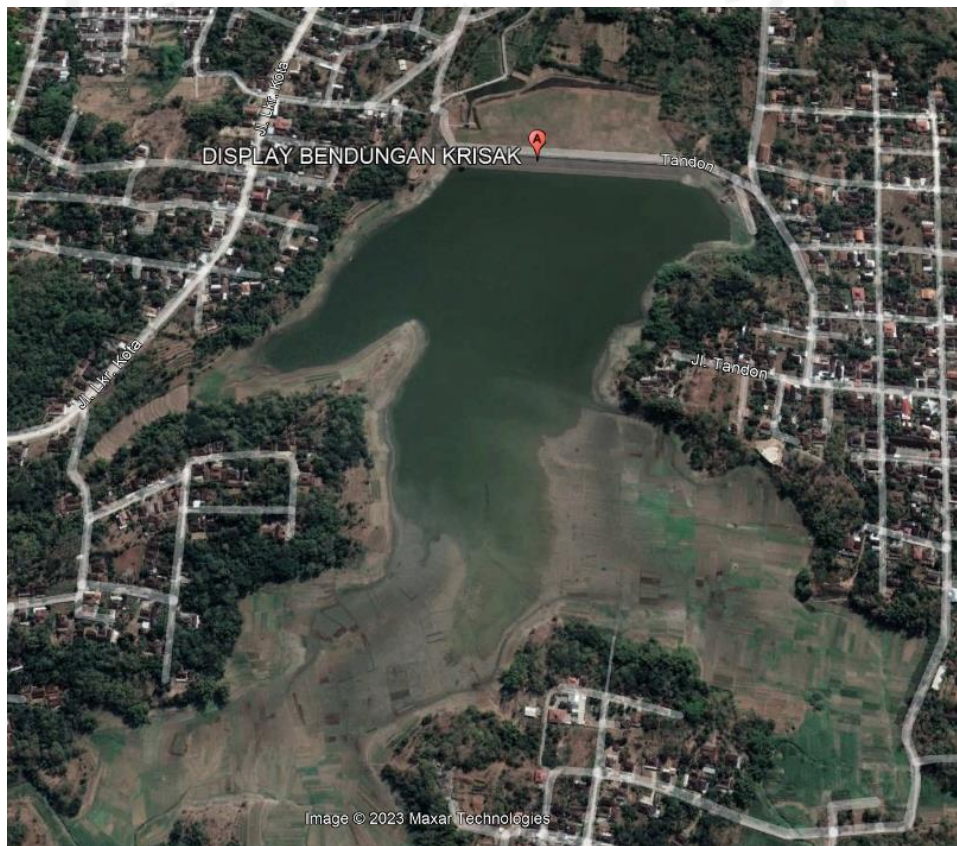
(Sumber : <https://www.geoslope.com/products/geostudio>)

## BAB IV

### METODE PENELITIAN

#### 4.1. Subjek Penelitian

Subjek Penelitian merupakan orang, tempat, atau benda yang diamati dalam rangka penelitian sebagai sasaran (Azis, 2011). Pada penelitian ini subjek penelitiannya yaitu Bendungan Krisak.



**Gambar 4. 1 Lokasi Bendungan Krisak**

(Sumber : Konsultan Perencana, 2019)



## 4.2. Objek Penelitian

Objek penelitian adalah hal yang menjadi sasaran penelitian atau pokok persoalan yang hendak diteliti untuk mendapatkan data secara lebih terarah (Azis, 2011). Pada penelitian ini objek penelitian yaitu tingkat risiko Bendungan Krisak, rembesan tubuh Bendungan Krisak dan stabilitas tubuh Bendungan Krisak.

## 4.3. Perangkat Lunak Pendukung Penelitian

Penelitian ini dilakukan menggunakan beberapa *software*. Penggunaan *software* bertujuan untuk memudahkan proses analisis. *Software Geostudio 2012* merupakan *software* yang menggunakan batas keseimbangan untuk menghitung faktor keamanan tanah dan lereng. Menganalisa stabilitas lereng, menggunakan batas keseimbangan, serta mempunyai kemampuan untuk menganalisis contoh tanah yang berbeda jenis dan tipe, longsor dan kondisi tekanan air pori dalam tanah yang berubah menggunakan bagian besar contoh tanah. Berikut ini beberapa bagian dari *Geostudio 2012* yang akan digunakan dalam penelitian ini diantaranya sebagai berikut.

1. *SLOPE/W* merupakan program yang digunakan untuk analisis stabilitas lereng, baik tanah maupun batuan, termasuk galian dan timbunan.
2. *SEEP/W* merupakan program yang digunakan untuk analisis rembesan air. Aplikasi dalam bendungan adalah analisis rembesan yang melewati tubuh dan fondasi bendungan, infiltrasi air lewat drainase dan sumur injeksi.

## 4.4. Tahap Penelitian

### 4.4.1. Studi Pustaka

Studi pustaka merupakan bagian integral dari setiap penelitian, baik yang dilakukan sebelum penelitian, pada waktu sedang melakukan penelitian atau dimungkinkan setelah melakukan penelitian dalam rangka pengembangan lebih lanjut (Mubtadi, 2011). Studi pustaka yang tepat akan memberikan kelancaran dalam proses penelitian dan penulisan karya ilmiah, karena studi pustaka mempunyai peran yang sangat penting untuk dimunculkan secara sistematis dan logis. Studi pustaka dilakukan terhadap penelitian yang serupa tentang keamanan

bendungan serta studi pustaka juga dilakukan pada studi terdahulu yang berkaitan dengan Bendungan Krisak.

#### **4.4.2. Pengumpulan Data**

Data yang digunakan berupa data sekunder. Data sekunder merupakan data yang telah tersedia dalam berbagai bentuk yang didapatkan oleh pihak lain (Khadafi, 2015). Data sekunder yang diperoleh dari pihak konsultan perencana. Terdapat beberapa data sekunder yang diperlukan dalam penelitian ini diantaranya sebagai berikut.

##### **1. Data Teknis Bendungan Krisak**

Bendungan Krisak adalah tipe urugan tanah homogen dari jenis tanah Lempungan. Tinggi bendungan 15 m dari dasar sungai dengan panjang puncak 350 m dan lebar puncak 5 m pada el. +115,00 m termasuk parapet. Bendungan Krisak mempunyai volume efektif 2,29 juta m<sup>3</sup> dan volume mati 0,049 juta m<sup>3</sup> dengan luas tampungan waduk pada elevasi muka air normal sebesar 45,78 Ha, rencana pemanfaatan untuk irigasi sebesar 340 Ha.

Tipe pelimpah yang terdapat pada Bendungan Krisak adalah ogee tanpa pintu (lama: dengan balok kayu/skotbalk, baru: permanen dari beton) dengan kapasitas pelimpah sebesar 118,917 m<sup>3</sup>/det. Elevasi mercu berada pada el. +113,50 dengan lebar mercu 33 m. Tipe bangunan pengambilan adalah bangunan pengambilan irigasi dengan pintu pengatur tipe pintu sorong yang diperasikan secara manual. Dasar intake berada pada elevasi +104,50 m. Data teknis Bendungan Krisak berdasarkan hasil kegiatan studi terbaru, data dari Balai Bendungan dan hasil survei inventarisasi konsultan disajikan dalam tabel berikut.

**Tabel 4. 1 Data Teknis Bendungan Krisak**

NO	Uraian	Balai Bendungan	Studi Terdahulu (Inspeksi Besar Bendungan Krisak, 2015)	Izin Operasi 2020
<b>1.</b>	<b>Data Umum</b>			
	No. Registrasi KNI-BB	3312.02.12.032	-	1019430035
	Lokasi	Desa Singodutan, Kecamatan Selogiri, Kabupaten Wonogiri, Provinsi Jawa Tengah	Desa Pare Kecamatan Selogiri Kabupaten Wonogiri, Provinsi Jawa Tengah	Desa Pare Kecamatan Selogiri Kabupaten Wonogiri, Provinsi Jawa Tengah
	Koordinat	-	-	7°48'02.7"S 110°53'59.7"E
	Tahun Konstruksi	-	-	1943
	Perencana	-	-	
	Pelaksana Konstruksi	-	-	
	Pemilik	-	-	
	Pengelola	BPSDA Bengawan Solo	Balai Wilayah Sungai Bengawan Solo	Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo
<b>2.</b>	<b>Hidrologi</b>			
	Sungai	Anak Sungai Krisak, Induk Sungai Bengawan Solo	Anak Sungai Krisak, Induk Sungai Bengawan Solo	Anak Sungai Krisak, Induk Sungai Bengawan Solo
	Luas DTA	3,50 km <sup>2</sup>	7,05 km <sup>2</sup>	7,05 km <sup>2</sup>
<b>3.</b>	<b>Tubuh Bendungan</b>			
	Tipe Urugan	Urugan tanah homogen	Urugan tanah homogen dengan jenis tanah di permukaan lanau lempung	Urugan tanah homogen
	Panjang Puncak	361,80 m	350,00 m	350,00 m
	Lebar Puncak	4,80 m	5,00 m	5,00 m
	Elevasi Puncak	114,50 m	+ 114,50 m	+ 115,20 m
	Elevasi Parapet	-	+115,50 m	+115,50 m
	Tinggi Puncak	20 m	20,00 m	20,00 m
<b>4.</b>	<b>Waduk</b>			
	Elevasi/ Luas Genangan/Volume	-	+ 113,50 m / - / 3,717 juta m <sup>3</sup>	+ 113,50 m/45,78 Ha/2,34 Juta m <sup>3</sup>

NO	Uraian	Balai Bendungan	Studi Terdahulu (Inspeksi Besar Bendungan Krisak, 2015)	Izin Operasi 2020
	Muka Air Normal			
	Elevasi/ Luas Genangan/Volume Muka Air Banjir	-/-/ 2,692 juta m <sup>2</sup>	+ 113,75 m / - / -	+ 113,70 m/49,86 Ha/2.77 juta m <sup>3</sup>
	Elevasi/ Luas Genangan/Volume Muka Air Minimum		+ 105,00 m / - / 1,025 juta m <sup>3</sup>	+ 105,00 m/6.31 ha/0.049 juta m <sup>3</sup>
	Volume Efektif		2,692 juta m <sup>3</sup>	2,692 juta m <sup>3</sup>
<b>5.</b>	<b>Pelimpah</b>			
	Tipe	"Ogee" tanpa pintu dengan skot balok	"Ogee" tanpa pintu dengan skot balok	"Ogee" tanpa pintu
	Elevasi Mercu	+ 113,50	+ 113,50 m	+ 113,50 m
	Panjang Mercu	32,90 m	33 m	32.965 m
	Lebar Mercu	-	-	1.00
	Kapasitas Pelimpah	92,24 m <sup>3</sup> /detik	92,24 m <sup>3</sup> /detik	90.5172 m <sup>3</sup> /detik
<b>6.</b>	<b>Bangunan Pengeluaran</b>			
	Tipe	Sorong ulir baja	Konduit	Sorong ulir baja
	Bentuk	Kiri 0,60, Kanan: 1,00	Lingkaran	-
	Diameter	Kiri 0,90, Kanan: 1,00	1,00m	-
	Jumlah	2 bh	1 bh	2 buah
	Panjang	Manual	81 m	Manual
	Tipe Alat Operasi	-	Pintu Sorong	+ 104,50 m
<b>7.</b>	<b>Instrumentasi</b>			
	<i>Piezometer</i>	28 bh, (pipa tegak)	28 Buah (pipa tegak)	34 buah pipa tegak, 6 buah electric
	<i>Multi layer settlement</i>	-	-	-
	Patok Geser	-	-	29 buah
	Sumur Pantau	-	-	-
	Alat ukur debit (v-notch)	1 bh	1bh	1 bh
	Stasiun Hujan	1 (belakang rumah jaga)	-	1 bh (rumah jaga)
	<i>Water Level Measurement</i>	1 bh (intake)	-	2 bh (intake)
<b>8.</b>	<b>Manfaat</b>			
	Irigasi	880,20 Ha	274 Ha	340 Ha

(Sumber : Konsultan Perencana, 2019)

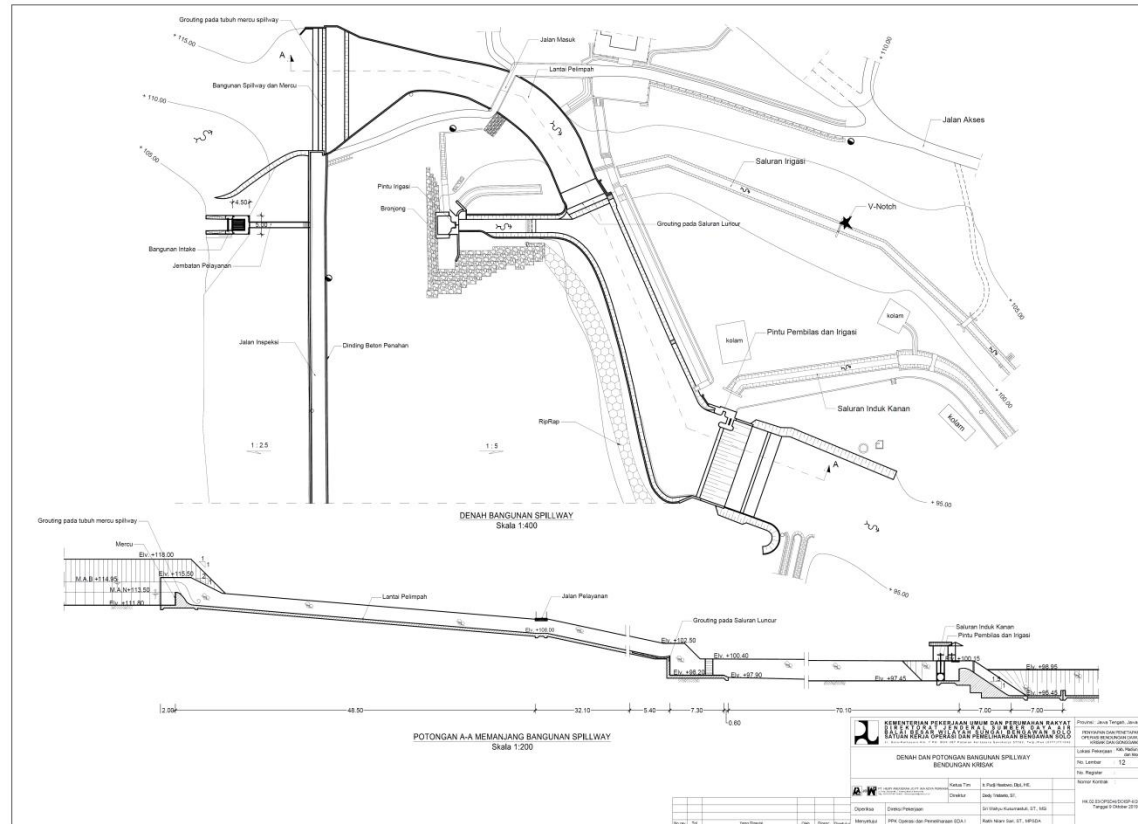
2. Data Topografi dan Gambar *As-Built Drawing* Bendungan Krisak

Berikut ini Peta situasi dan Potongan tubuh bendungan Krisak dapat dilihat pada gambar sebagai berikut.

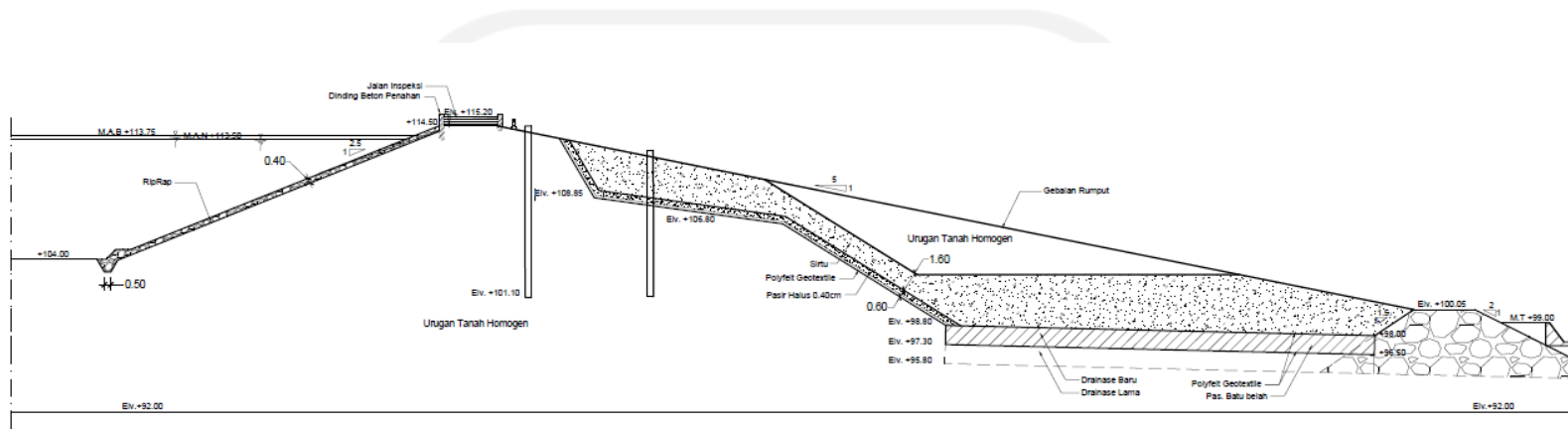


**Gambar 4. 2 Peta Situasi Bendungan Krisak**

(Sumber : Konsultan Perencana, 2019)

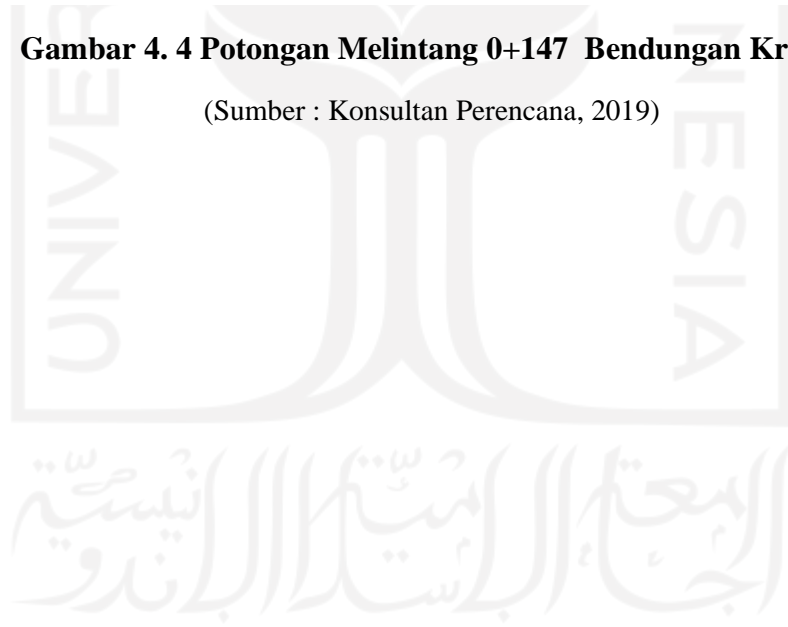


Gambar 4. 3 Peta Situasi Bendungan Krisak  
(Sumber : Konsultan Perencana, 2019)



**Gambar 4. 4 Potongan Melintang 0+147 Bendungan Krisak**

(Sumber : Konsultan Perencana, 2019)





### 3. Data Tanah Bendungan Krisak

Data tanah bendungan Krisak didapatkan dari data konsultan perencana. Pada inti bendungan berupa tanah lempung dengan Nilai Berat Jenis (Gs) sebesar 2.57 dan nilai angka pori sebesar 1.15 . Data tanah dapat dilihat pada tabel berikut ini.

**Tabel 4. 2 Data Tanah**

NO	Jenis Tanah	Berat Volume ( $\gamma$ ) KN/m <sup>3</sup>	Kohesi (c) KN/m <sup>2</sup>	Sudut Geser ( $^{\circ}$ )	Koefisien Permeabilitas (K) m/s
1	Lempung	18,5	25,5	24,18	$0,89 \times 10^{-5}$
2	Riprap	21	0	40	1
3	Toe Drain	21	0	40	1
4	Filter Kasar	18	0	30	0,01
5	Filter Halus	19,2	0	35	0,001
6	Geotextile	9,41	0	40	$10^{-8}$
8	Pondasi	20,60	19,62	42	$10^{-6}$

(Sumber : Konsultan Perencana, 2019)

#### 4.4.3. Penentuan Tingkat Risiko Bendungan

Penentuan tingkat risiko bendungan dilakukan dengan menganalisis data teknis terbaru guna mengetahui kelas tingkat risiko sehingga dapat menentukan kala ulang gempa yang akan digunakan dalam analisis dinamik pada tubuh bendungan. Penentuan tingkat risiko bendungan dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3.32. dengan mempertimbangkan penialain yang ada di Tabel 3.5, dan Tabel 3.6. Setelah mengetahui tingkat risiko kriteria beban gempa dapat ditentukan dengan mengikuti Tabel 3.7.

#### 4.4.4. Penentuan Beban Gempa

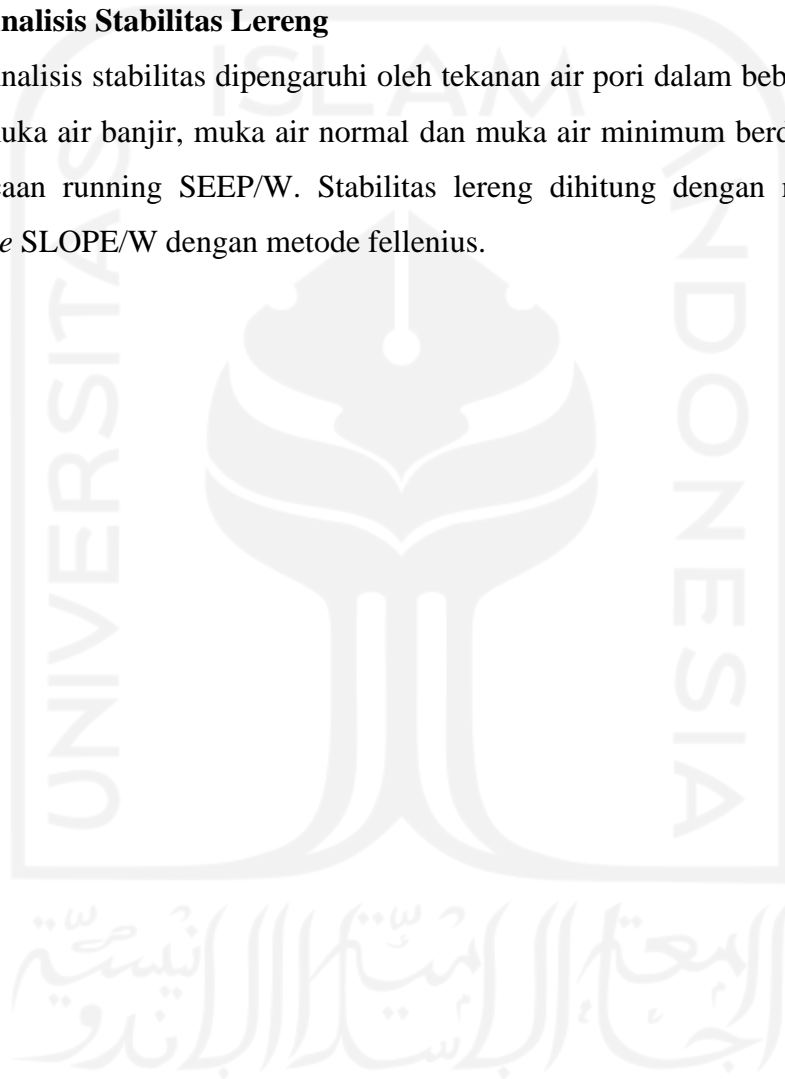
Beban gempa dilakukan dengan meninjau dua tinjauan gempa yaitu beban gempa OBE dan MDE. Perhitungan beban gempa dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3.33 sampai dengan Persamaan 3.38. Beban gempa juga dilakukan dengan menggunakan peta gempa terbaru yaitu Peta gempa 2017.

#### 4.4.5. Analisis Rembesan

Analisis rembesan dilakukan pada tubuh bendungan dengan meninjau debit rembesan, kecepatan filtrasi dan gradien hidraulik. Analisis rembesan didapatkan dari hasil analisis dengan menggunakan SEEP/W.

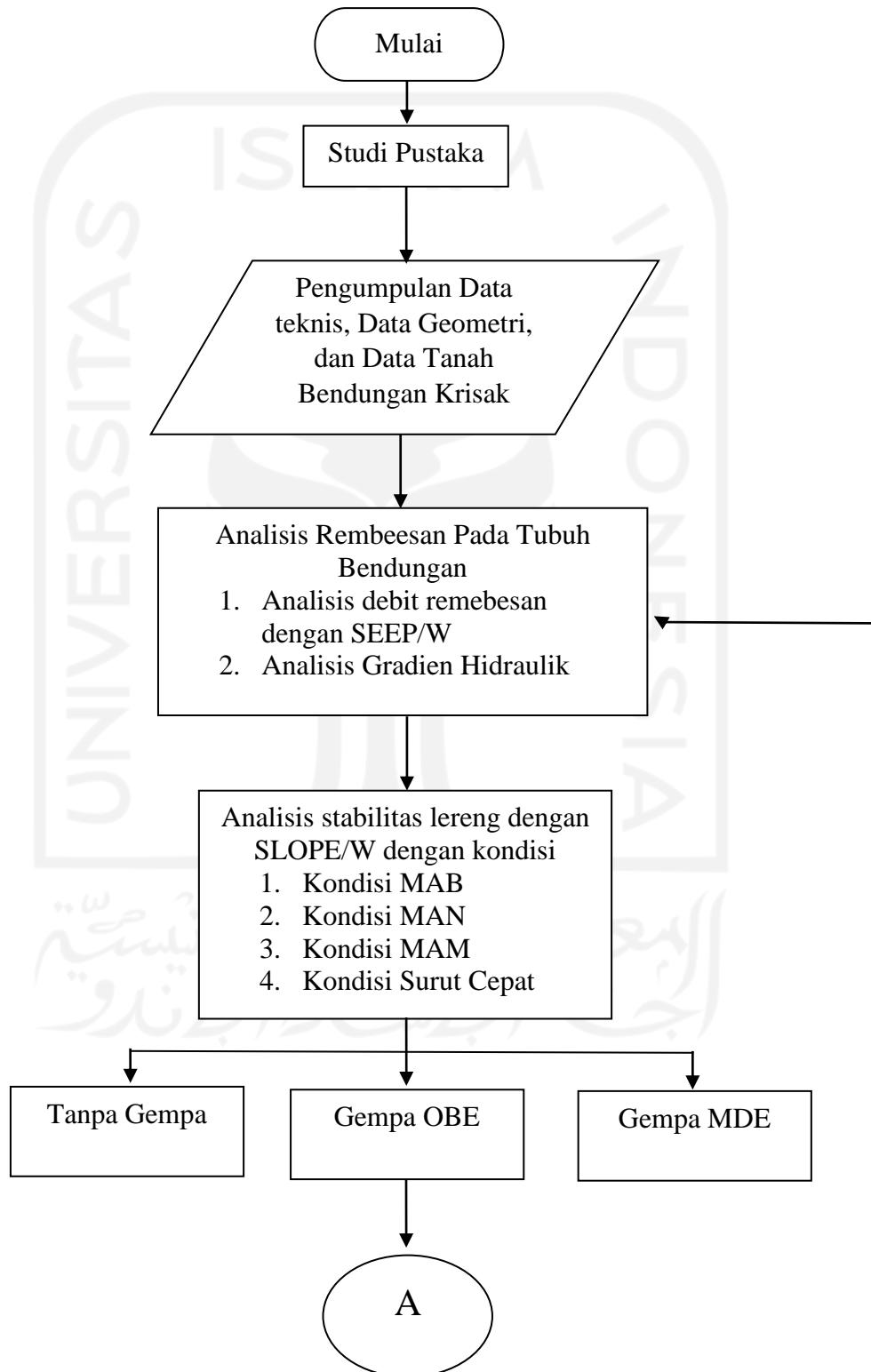
#### 4.4.6. Analisis Stabilitas Lereng

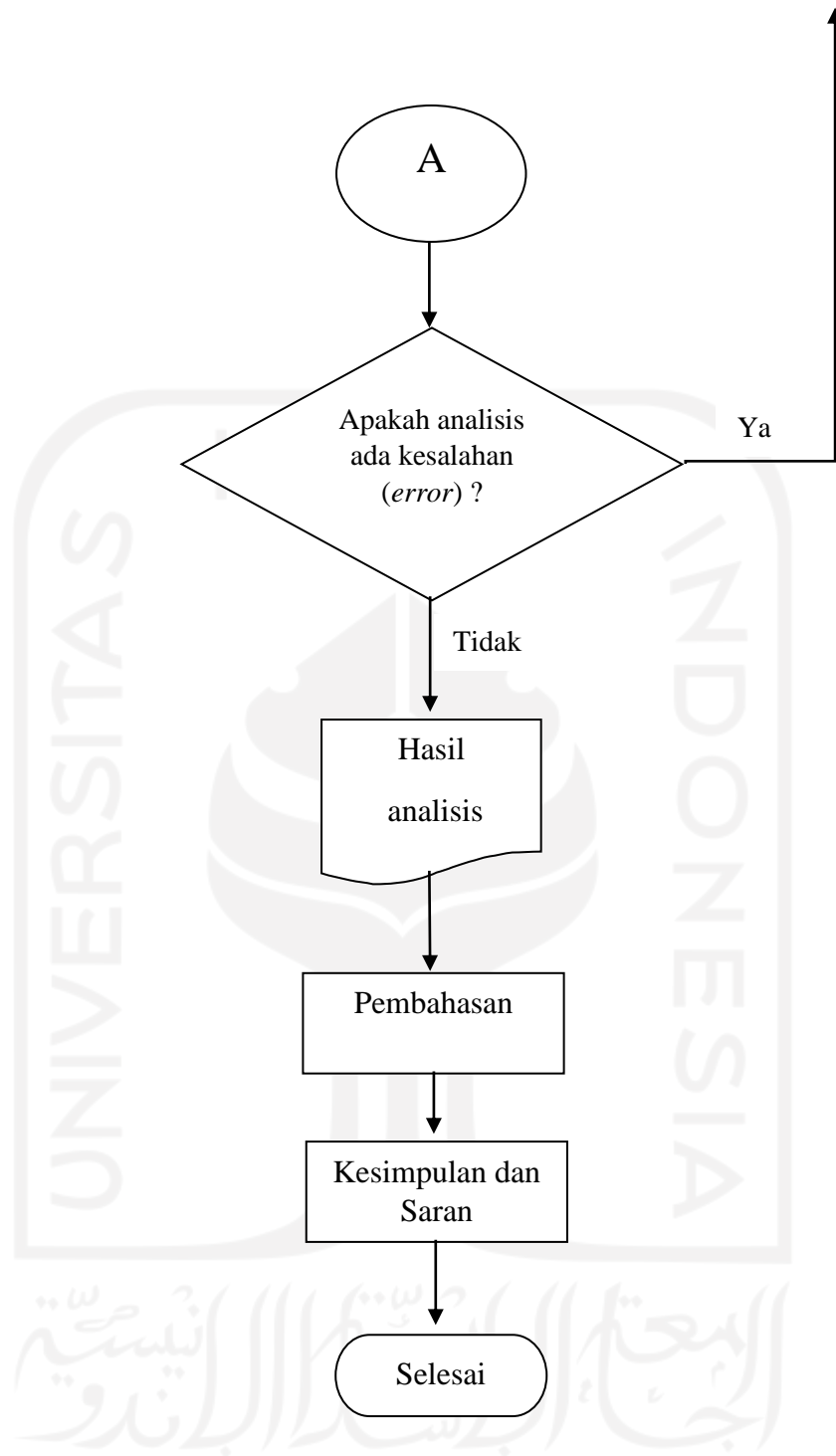
Analisis stabilitas dipengaruhi oleh tekanan air pori dalam beberapa kondisi yaitu muka air banjir, muka air normal dan muka air minimum berdasarkan hasil pembacaan running SEEP/W. Stabilitas lereng dihitung dengan menggunakan *software* SLOPE/W dengan metode fellenius.



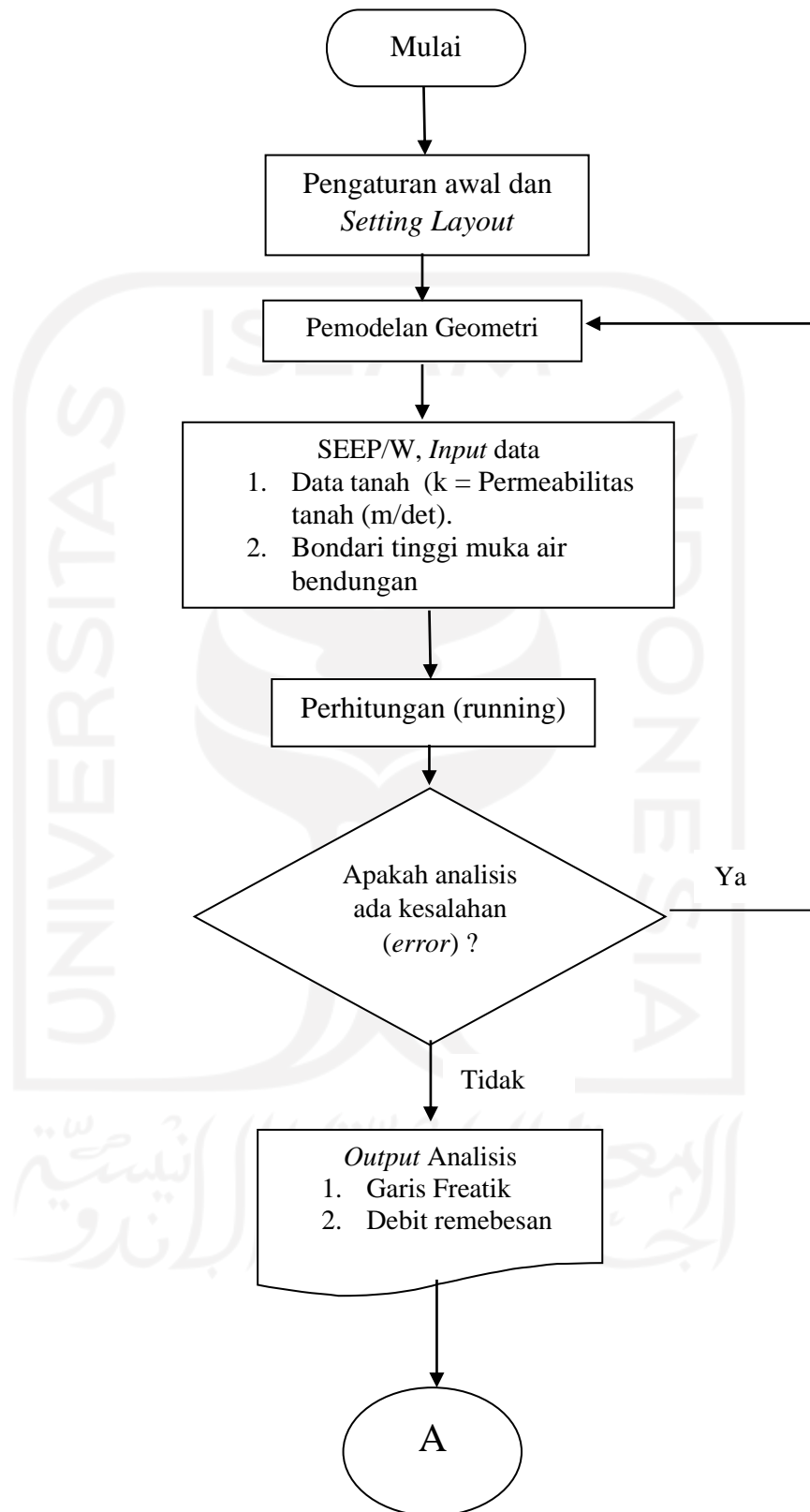
#### 4.5. Bagan Penelitian

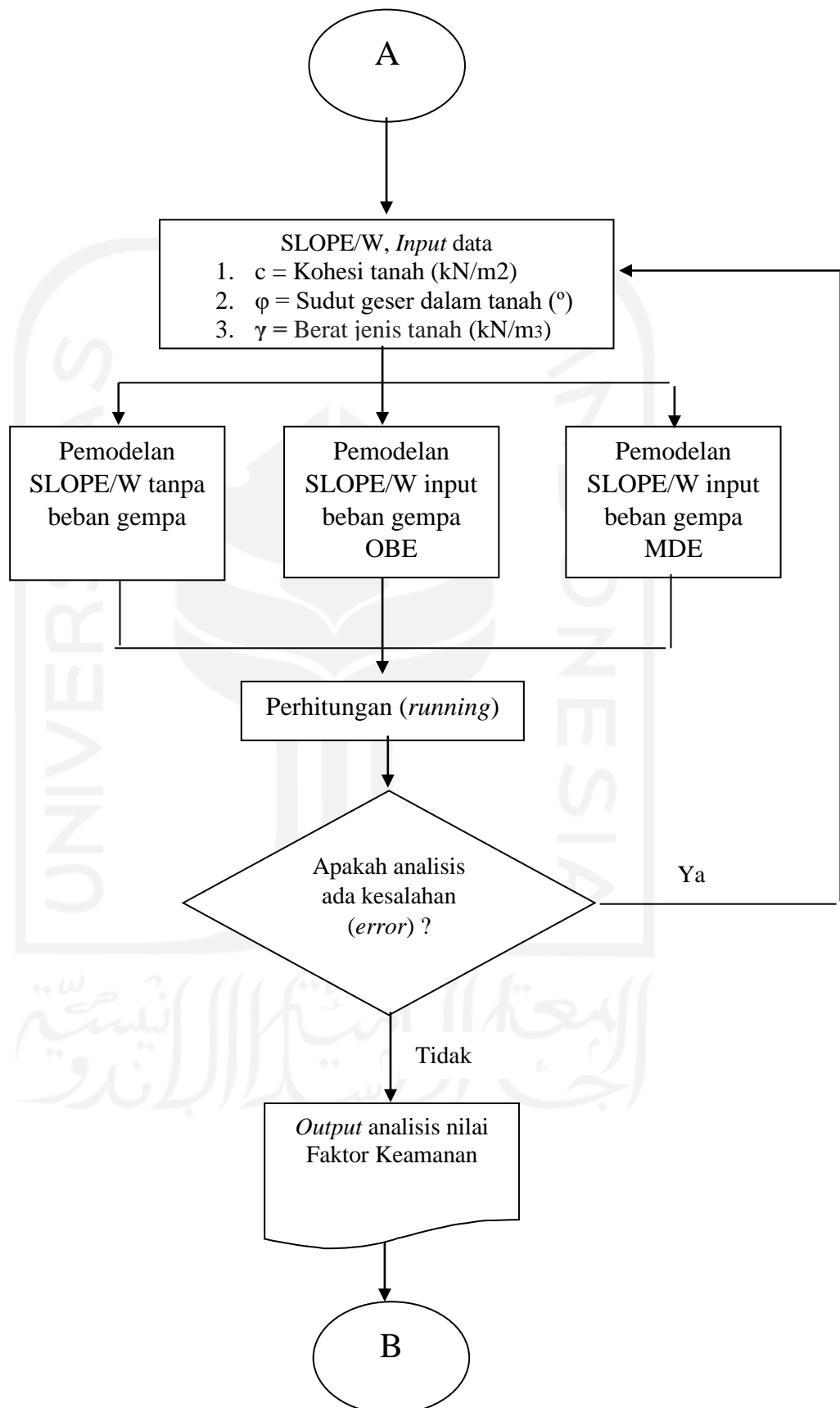
Bagan alir penelitian dan bagan alir pemodelan GeoStudio dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 sebagai berikut.

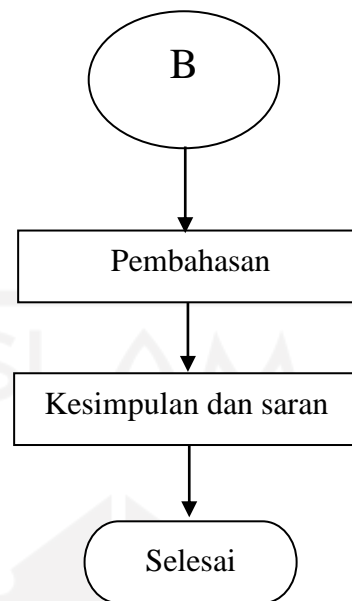




**Gambar 4.5 Bagan Alir Penelitian**







**Gambar 4. 6 Bagan Alir Pemodelan Geostudio**



## BAB V

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN

#### 5.1. Tingkat Risiko Bendungan Krisak

Tingkat risiko bangunan untuk bendungan Krisak dihitung dengan data teknis pada Tabel 4.1 sehingga didapatkan nilai Faktor Risiko. Faktor resiko dihitung berdasarkan Tabel 3.2. Berikut ini perhitungan faktor risiko seperti pada Tabel 5.1 berikut ini.

**Tabel 5. 1 Hasil Perhitungan Faktor Risiko**

No	Parameter	Data	Faktor Risiko
1	Kapasitas Bendungan	2.692.000 m <sup>3</sup>	4
2	Tinggi Bendungan	20 m	2
3	Kebutuhan Evakuasi	4.836 jiwa	12
4	Tingkat Kerusakan	Tinggi	10
Faktor Resiko (FR <sub>total</sub> )			28

Berdasarkan hasil perhitungan nilai faktor risiko (FR<sub>total</sub>) sebesar 28 sehingga berdasarkan Tabel 3.3 diatas termasuk ke dalam kelas risiko Tinggi dan kriteria beban gempa berdasarkan Tabel 3.4 untuk beban gempa OBE menggunakan kala ulang 100 tahun dan MDE menggunakan kala ulang 5000 tahun.

#### 5.2. Koefisien Gempa

Berikut ini hasil perhitungan koefiesn gempa pada kala ulang 100 tahun untuk gempa OBE dan kala ulang 5000 tahun untuk gempa MDE dengan menggunakan Persamaan 3.33 sampai dengan Persamaan 3.38 yang dapat dilihat pada Tabel 5.2 sebagai berikut.

**Tabel 5. 2 Koefisien Gempa**

PERIODE ULANG T (TAHUN)	S <sub>PGA</sub>	F <sub>PGA</sub>	P <sub>GAM</sub>	kh	Koefisien gempa biasa	Koefisien Gempa Termodifikasi
100	0,10	1,00	0,10	0,1019	0,0714	0,0510

5000	0,30	1,00	0,30	0,3058	0,2141	0,1529
------	------	------	------	--------	--------	--------

### 5.3. Perhitungan Rembesan

#### 5.3.1. Debit Rembesan

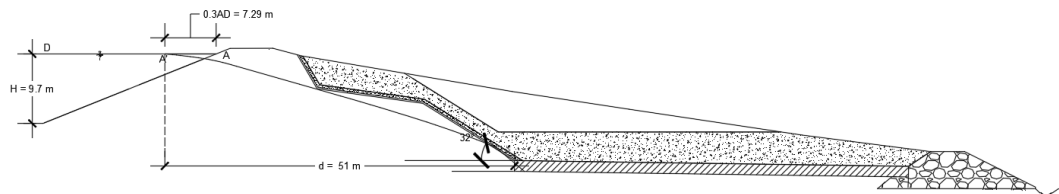
##### 1. Analisis Debit rembesan Secara Manual

Pada analisis rembesan di tubuh bendungan Krisak secara manual data yang di input yaitu koefisien permeabilitas untuk tanah pada pemodelan geometri dan kondisi batasnya data yang diinput berupa ketinggian muka air dan debitnya. Tiga tinjauan muka air di antaranya sebagai berikut.

1. Muka air banjir : 113,75 m
2. Muka air normal : 113,5 m
3. Muka air minimum : 105 m

##### a. Rembesan Kondisi MAB

Analisis dilakukan pada kondisi MAB dan dengan menggunakan Persamaan 3.26.



**Gambar 5. 1 Garis Rembesan Manual dengan Cara Casagrande Kondisi MAB**

$$H_{hulu} = 9,7 \text{ m}$$

$$H_{hulu}^2 = 94,09 \text{ m}$$

$$\alpha = 32^{\circ}$$

$$\tan \alpha = 0,624$$

$$\cot^2 \alpha = 2,561$$

$$\sin \alpha = 0,529$$

$$\sin^2 \alpha = 0,280$$

$$k = 8,90\text{E-}06$$

$$d = 51 \text{ m}$$

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

$$a = \sqrt{(51^2 + 9,7^2)} - \sqrt{(9,7^2) \times 2,56}$$

$$= 33.33 \text{ m}$$

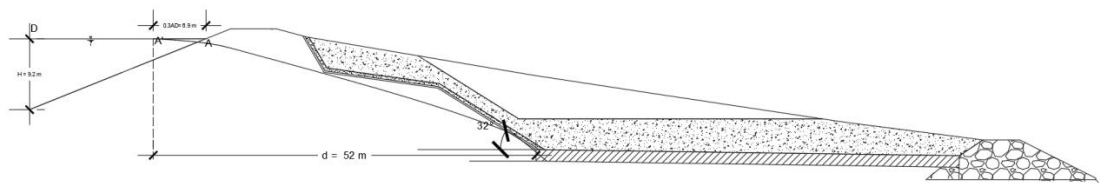
$$q = k \times a \times \sin^2 \alpha$$

$$q = 8,90\text{E-}06 \times 3.33 \times 0,280$$

$$= 8,332 \text{ E-}06 \text{ m}^3/\text{dt}$$

#### b. Rembesan Kondisi MAN

Analisis dilakukan pada kondisi MAN dan dengan menggunakan Persamaan 3.26.



**Gambar 5. 2 Garis Rembesan Manual dengan Cara Casagrande Kondisi  
MAN**

$$H_{hulu} = 9,2 \text{ m}$$

$$H_{hulu}^2 = 84,64 \text{ m}$$

$$\alpha = 32^{\circ}$$

$$\tan \alpha = 0,624$$

$$\cot^2 \alpha = 2,561$$

$$\sin \alpha = 0,529$$

$$\sin^2 \alpha = 0,280$$

$$k = 8,90\text{E-}06$$

$$d = 52 \text{ m}$$

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

$$a = \sqrt{(52^2 + 9,2^2)} - \sqrt{(9,2^2) \times 2,56}$$

$$= 2,94 \text{ m}$$

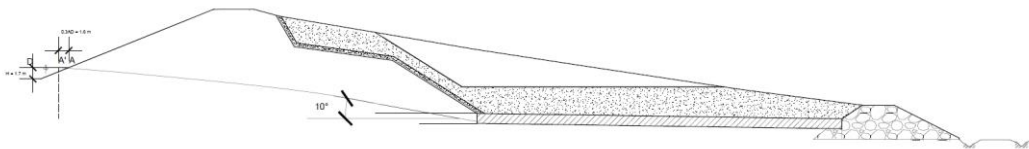
$$q = k \times a \times \sin^2 \alpha$$

$$q = 8,90\text{E-}06 \times 2,94 \times 0,280$$

$$= 7,33 \text{ E-}07 \text{ m}^3/\text{dt}$$

c. Rembesan Kondisi MAM

Analisis dilakukan pada kondisi MAM dan dengan menggunakan Persamaan 3.26.



**Gambar 5. 3 Garis Rembesan Manual dengan Cara Casagrande Kondisi MAM**

$$H_{hulu} = 1,7 \text{ m}$$

$$H_{hulu}^2 = 2,89 \text{ m}$$

$$\alpha = 10^\circ$$

$$\tan \alpha = 0,17$$

$$\cot^2 \alpha = 32,16$$

$$\sin \alpha = 0,17$$

$$\sin^2 \alpha = 0,03$$

$$k = 8,90\text{E-}06$$

$$d = 63 \text{ m}$$

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

$$a = \sqrt{(63^2 + 1,7^2)} - \sqrt{(1,7^2) \times 32,16}$$

$$= 0,77 \text{ m}$$

$$q = k \times a \times \sin^2 \alpha$$

$$q = 8,90\text{E-}06 \times 0,77 \times 0,17$$

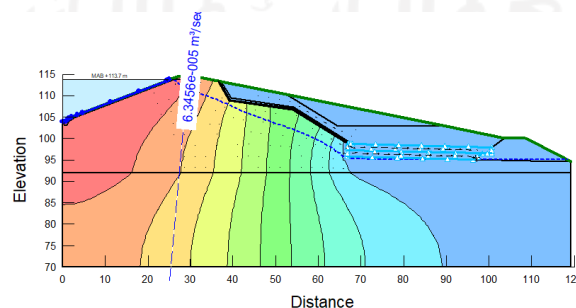
$$= 2,05 \text{ E-}07 \text{ m}^3/\text{dt}$$

## 2. Analisis Debit rembesan dengan Menggunakan GeoStudio 2012 Seep/W

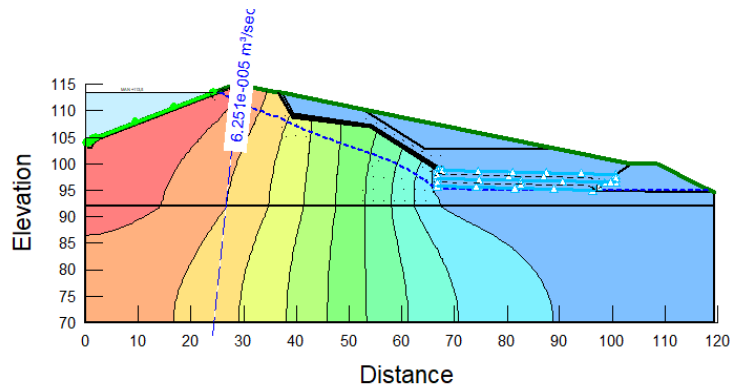
Pada analisis rembesan di tubuh bendungan Krisak dengan *GeoStudio 2012 Seep/W* data yang di input yaitu koefisien permeabilitas untuk tanah pada pemodelan geometri dan kondisi batasnya data yang diinput berupa ketinggian muka air dan debitnya. Tiga tinjauan muka air di antaranya sebagai berikut.

4. Muka air banjir : 113,75 m
5. Muka air normal : 113,5 m
6. Muka air minimum : 105 m

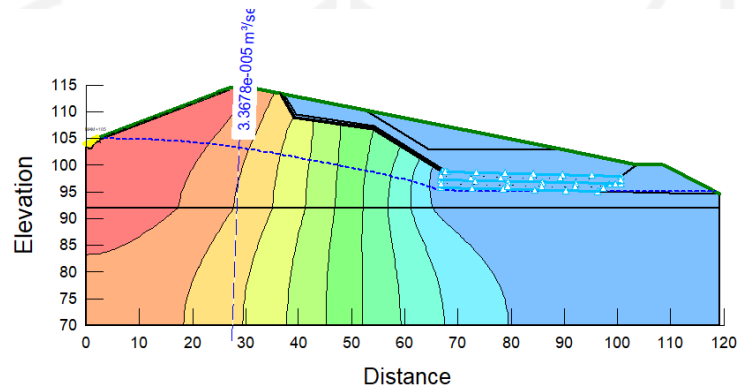
data tanah yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan Geometri menggunakan Gambar 4.3. Berikut ini hasil perhitungan rembesan berdasarkan keadaan muka air dapat dilihat pada Gambar 5.1 sampai dengan Gambar 5.3 dibawah ini.



**Gambar 5. 4 Hasil Analisis Rembesan Keadaan Muka Air Banjir Menggunakan Geostudio 2012 SEEP/W**



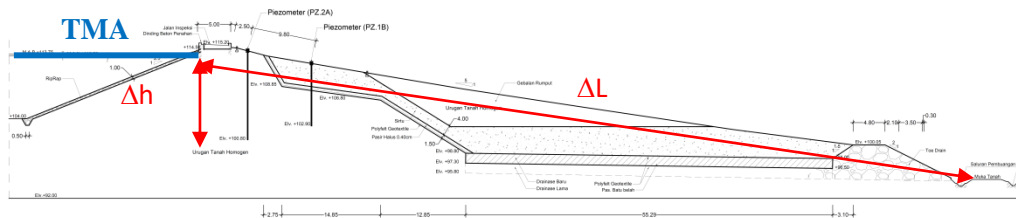
**Gambar 5. 5 Hasil Analisis Rembesan Keadaan Muka Air Normal Menggunakan Geostudio 2012 SEEP/W**



**Gambar 5. 6 Hasil Analisis Rembesan Keadaan Muka Air Minimum Menggunakan Geostudio 2012 SEEP/W**

**5.3.2. Gradien Hidraulik**

Keamanan terhadap bahaya piping dianalisis dengan pendekatan perbandingan gradien hidrolis aliran terhadap gradien kritisnya, dimana gradien hidrolis yang terjadi harus lebih kecil dari gradien hidrolis kritisnya.



**Gambar 5. 7 Keterangan Perhitungan Gradien Hidraulik Bendungan**

**Tabel 5. 3 Kondisi Aliran Filtrasi**

No	Kondisi	TMA (m)	$\Delta h$ (m)	$\Delta L$ (m)
1	MAB	113,75	18,66	116,40
2	MAN	113,75	18,4	117,00
3	MAM	105,00	9,90	137,14

Berdasarkan data tanah yang didapatkan parameter tanah pada lapisan inti yaitu Pada inti bendungan berupa tanah lempung dengan Nilai Berat Jenis (Gs) sebesar 2,57 dan nilai angka pori (e) sebesar 1,15 Berikut ini hasil perhitungan gradien hidrolis kritis ( $i_c$ ) dengan Persamaan 3.24 sebagai berikut.

$$i_c = \frac{(2,57-1)}{1+1,15}$$

$$= 0,730$$

Perhitungan gradien maksimum dilakukan dengan Persamaan 3.25. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 5.5 sebagai berikut.

**Tabel 5. 4 Perhitungan Gradien Hidraulik**

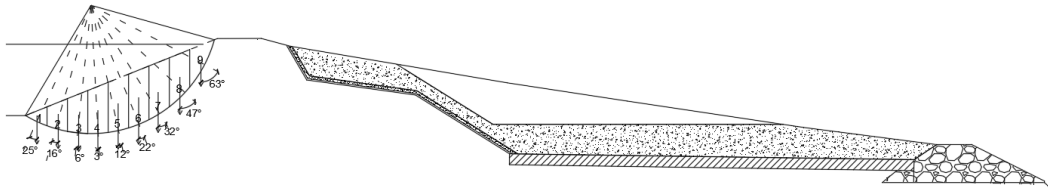
No	Kondisi	TMA (m)	$\Delta h/ \Delta L$	$I_c$	I
1	MAB	113,75	0,160	0,73	4,55
2	MAN	113,75	0,157	0,73	4,64
3	MAM	105,00	0,072	0,73	10,11

## 5.4. Perhitungan Stabilitas Lereng

### 5.4.1. Perhitungan Stabilitas lereng Manual

Analisis stabilitas lereng cara Fellenius (1927) dalam Hardiyatmo (2002) menganggap gaya-gaya yang bekerja pada sisi kanan-kiri dari sembarang irisan mempunyai resultan nol pada arah tegak lurus bidang longsor. Dengan anggapan ini, keseimbangan arah vertikal dan gaya-gaya yang bekerja dengan memperhatikan tekanan air pori. Analisis dilakukan hanya pada kondisi MAB tanpa gempa pada lereng hulu, hal ini dilakukan karena tidak memungkinkan melakukan *trial and error* untuk mendapat nilai SF kritis dengan beberapa bidang gelincir, sehingga untuk mendapatkan nilai SF paling kritis perlu dilakukan dengan bantuan program. Berikut ini analisis secara manual dengan menggunakan metode Fellenius.





**Gambar 5. 8 Irisan Lereng Hulu**

1. Perhitungan Manual Fellenius
  - Tinjauan pada pada irisan no. 4
  - a. Perhitungan berat irisan tanah
 
$$W_4 = 17,85 \times 18,5$$

$$= 330,18 \text{ KN}$$
  - b. Perhitungan  $\sin \alpha$ 

$$\sin \alpha_4 = \sin (-25)$$

$$= -0,42$$
  - c. Perhitungan  $\cos \alpha$ 

$$\cos \alpha = \cos (-25)$$

$$= 0,91$$
  - d. Perhitungan  $W_t \times \sin \alpha$ 

$$W_{t4} \sin \alpha = 330,18 \times -0,42$$

$$= -17,28 \text{ KN}$$
  - e. Perhitungan  $W_t \times \cos \alpha$ 

$$W_{t4} \cos \alpha = 706,2799 \times 0,9574$$

$$= 676,2067 \text{ KN}$$
  - f. Perhitungan Tekanan Pori
 

Tekanan air pori pada irisan no.4 ( $u_4$ ) =  $9,81 \times 15,99 = 156,88 \text{ KN}$

Panjang garis longsor  $a_4 = 2,79 \text{ m}$

$$U_4 = 156,88 \times 2,79$$

$$= 438,136 \text{ KN}$$
  - g. Tahanan terhadap longsor
 
$$a_4 c_4 = 2,79 \times 24,81$$

$$= 71,21 \text{ KN}$$

Berikut ini hasil dari perhitungan manual stabilitas lereng bendungan Krisak, dapat dilihat pada Tabel dibawah ini.

**Tabel 5. 5 Rekapitulasi Perhitungan Manual Stabilitas Lereng Dengan Metode Fellenius**

No Irisan	A (m <sup>2</sup> )	$\gamma$	Wn (KN/m)	$\alpha$	Sin $\alpha$	Cos $\alpha$	a	Wn x Sin $\alpha$	Wn x Cos $\alpha$	Aa	U	U.a	Wn x Cos $\alpha$ - U.a	c.a	
1	4.07	18.50	75.22	-25	-0.42	0.91	3.31	-31.79	68.18	5.05	49.58	163.99	-95.81	84.34	
2	10.00	18.50	185.00	-16	-0.28	0.96	2.89	-50.99	177.84	15.16	148.74	429.99	-252.15	73.72	
3	14.45	18.50	267.39	-6	-0.10	0.99	2.80	-27.95	265.92	19.09	187.26	524.41	-258.49	71.41	
4	17.85	18.50	330.18	-3	-0.05	1.00	2.79	-17.28	329.73	15.99	156.88	438.14	-108.41	71.22	
5	19.88	18.50	367.84	12	0.21	0.98	2.86	76.48	359.80	12.89	126.44	361.08	-1.27	72.82	
6	20.58	18.50	380.65	22	0.37	0.93	3.01	142.59	352.93	9.79	95.99	288.87	64.07	76.74	
7	19.69	18.50	364.19	32	0.53	0.85	3.30	192.99	308.85	6.68	65.55	216.57	92.28	84.25	
8	16.66	18.50	308.29	47	0.73	0.68	3.89	225.47	210.25	3.58	35.10	136.65	73.61	99.27	
9	10.33	18.50	191.04	63	0.89	0.45	7.29	170.22	86.73	0.66	6.49	47.32	39.41	185.94	
JUMLAH								32.15	679.74	2160.24			2607.01	-446.78	819.71

Nilai faktor keamanan sesuai dengan Persamaan 3.33.

$$FS = \frac{819,71 + (4767,25) \times \text{tg } 24,81^\circ}{679,74}$$

$$= 4,440$$

Berdasarkan data yang telah diperoleh, dengan menggunakan metode Fellenius didapatkan nilai faktor keamanan lereng = 4,440 . Hal tersebut menunjukkan bahwa lereng dikategorikan dalam lereng stabil, yang artinya lereng tersebut masih aman dari kelongsoran.

#### 5.4.2. Stabilitas Lereng dengan Garis Freatik Manual

Besarnya angka aman dari tubuh Bendungan Krisak dihitung dengan *software GeoStudio 2012 Slope/W* yang berbasis *finite element*. SLOPE/W merupakan program yang digunakan untuk analisis stabilitas lereng, baik tanah maupun batuan, termasuk galian dan timbunan. Pada analisis ini tipe analisis yang digunakan yaitu *ordinary (fellenius)* dan *slip surface* yang digunakan yaitu *entry-*

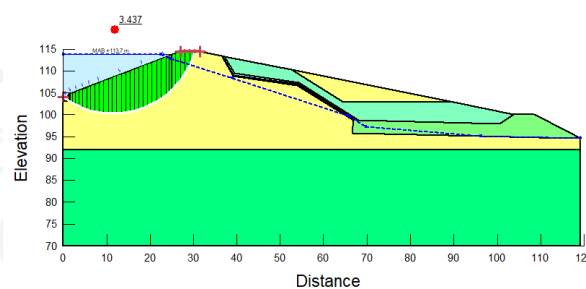
*exit*. Parameter yang dibutuhkan pada analisis ini yaitu koefisien gempa dan data tanah berupa berat jenis tanah, kohesi dan sudut geser tanah. Tinjauan lereng yang dianalisis terdiri dari lereng hulu (*upstream*) dan lereng hilir (*downstream*) dengan 4 tinjauan keadaan situasi bendungan diantaranya sebagai berikut.

1. Muka air banjir.
2. Muka air normal.
3. Muka air minimum.
4. Surut cepat (*rapid drawdown*)

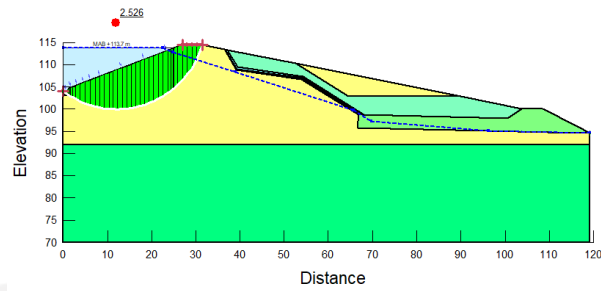
Pemodelan dilakukan di *Geostudio 2012 Slope/W* dengan menggunakan garis freatik dari perhitungan rembesan secara manual dengan metode *cassangramde*, Hasil analisis keamanan stabilitas bendungan Krisak dengan beberapa kondisi dan data tanah yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan Geometri menggunakan Gambar 4.3.

1. Kondisi Muka Air Banjir

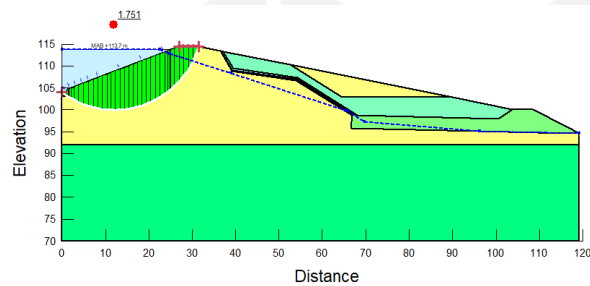
Berdasarkan data teknis yang dapat dilihat pada Tabel 4.1, kondisi muka air banjir berada pada elevasi +113,75. Garis freatik menggunakan output dari analisis menggunakan *SEEP/W*. Hasil analisis kondisi muka air banjir di lereng hulu dan hilir dengan tanpa gempa, gempa OBE dan MDE dapat dilihat pada Gambar 5.5 sampai dengan Gambar 5.10. sebagai berikut.



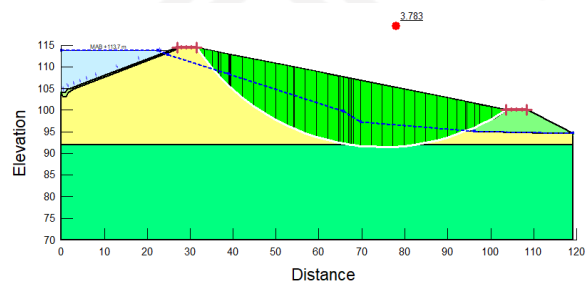
**Gambar 5.9 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Banjir Tanpa Beban Gempa dengan Garis Freatik Manual**



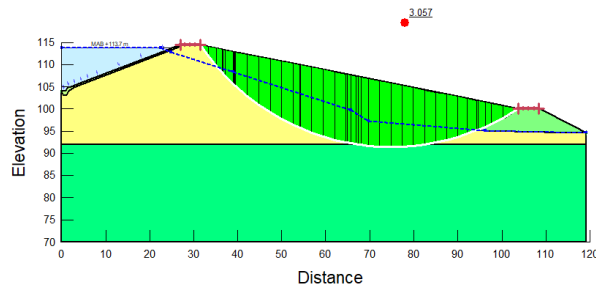
**Gambar 5. 10 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Banjir Dengan Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual**



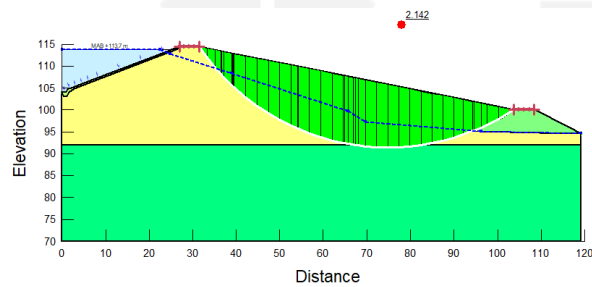
**Gambar 5. 11 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Banjir Dengan Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual**



**Gambar 5. 12 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Banjir Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual**



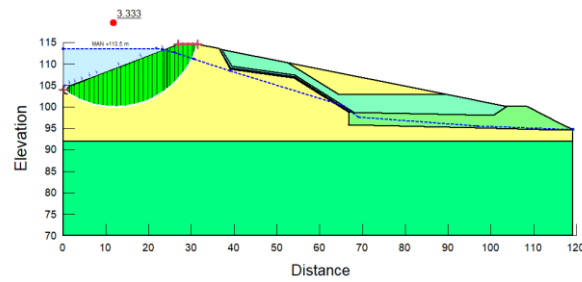
**Gambar 5. 13 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Banjir Dengan Beban Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual**



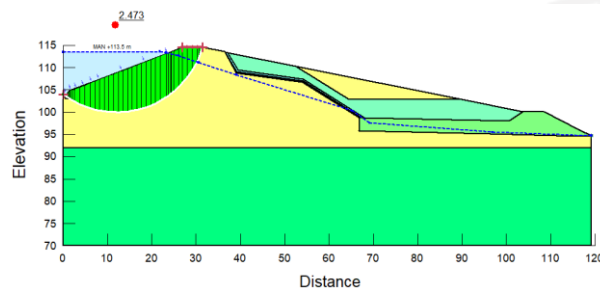
**Gambar 5. 14 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Banjir Dengan Beban Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual**

## 2. Kondisi Muka Air Normal

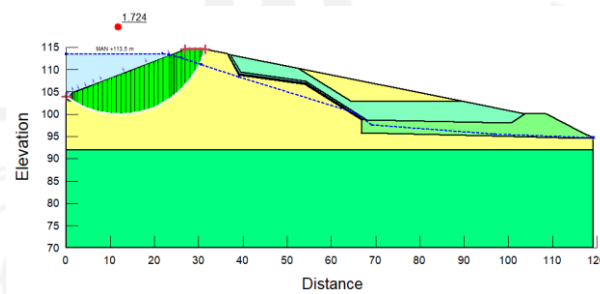
Berdasarkan data teknis yang dapat dilihat pada Tabel 4.1, kondisi muka air banjir berada pada elevasi +113,5. Garis freatik menggunakan output dari analisis menggunakan SEEP/W. Hasil analisis kondisi muka air normal di lereng hulu dan hilir dengan tanpa gempa, gempa OBE dan MDE dapat dilihat pada Gambar 5.X sampai dengan Gambar 5.11 sampau dengan Gambar 5.16 sebagai berikut.



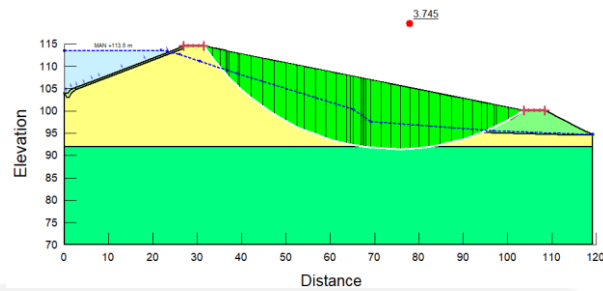
**Gambar 5. 15 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Normal Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual**



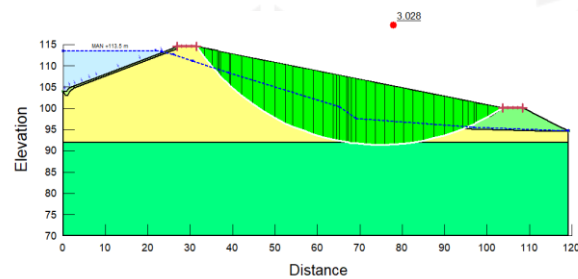
**Gambar 5. 16 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Normal Dengan Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual**



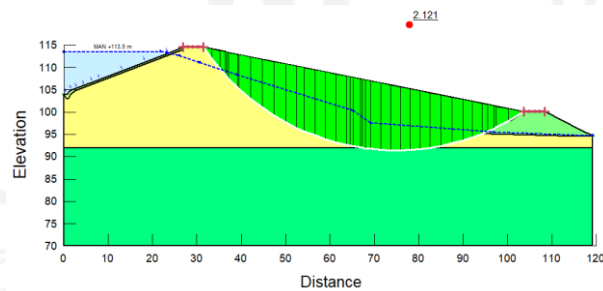
**Gambar 5. 17 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Normal Dengan Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual**



**Gambar 5. 18 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Normal Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual**



**Gambar 5. 19 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Normal Dengan Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual**



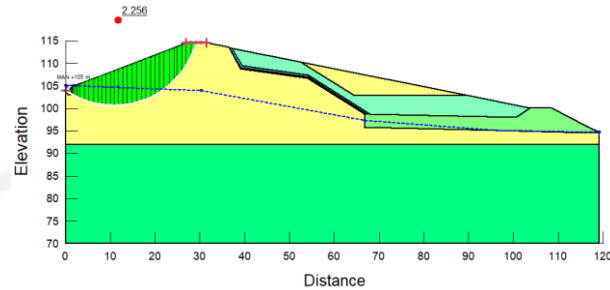
**Gambar 5. 20 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Normal Dengan Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual**

### 3. Kondisi Muka Air Minimum

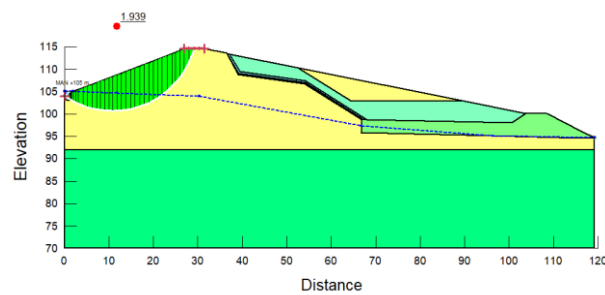
Berdasarkan data teknis yang dapat dilihat pada Tabel 4.1, kondisi muka air banjir berada pada elevasi +105. Garis freatik menggunakan output dari analisis menggunakan SEEP/W. Hasil analisis kondisi muka air minimum di lereng hulu



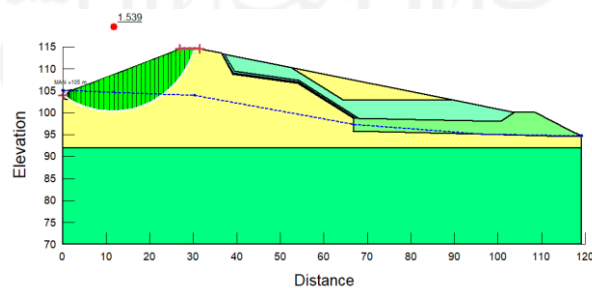
dan hilir dengan tanpa gempa, gempa OBE dan MDE dapat dilihat pada Gambar 5.17 sampai dengan Gambar 5.22 sebagai berikut.



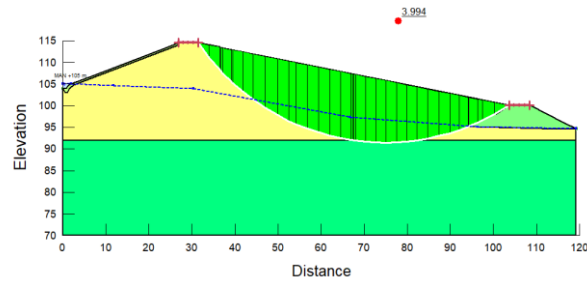
**Gambar 5. 21 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Minimum Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual**



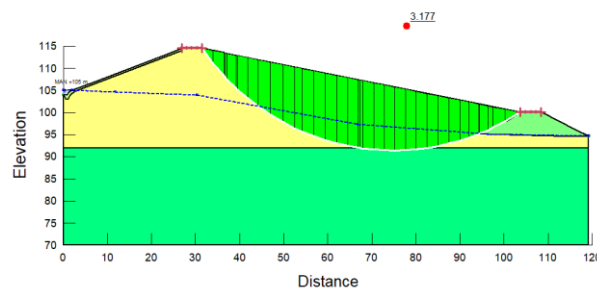
**Gambar 5. 22 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Minimum Dengan Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual**



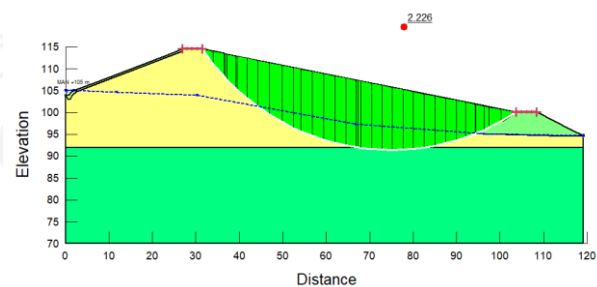
**Gambar 5. 23 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Minimum Dengan Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual**



**Gambar 5. 24 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Minimum Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual**



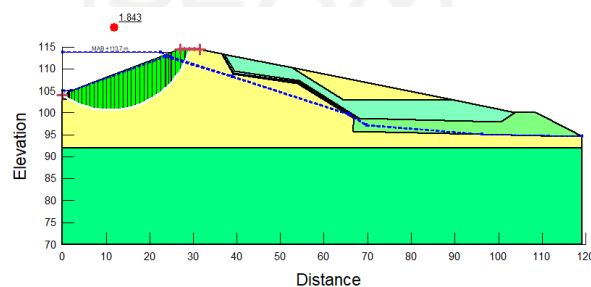
**Gambar 5. 25 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Minimum Dengan Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual**



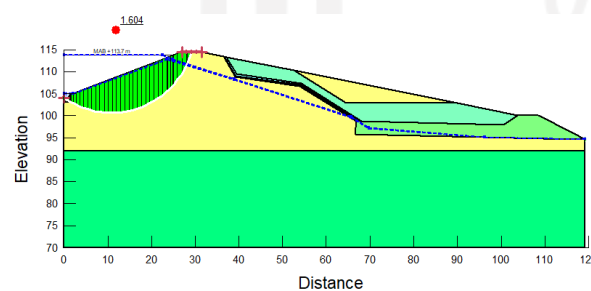
**Gambar 5. 26 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Minimum Dengan Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual**

#### 4. Kondisi Surut Cepat (*Rapid Draw Down*)

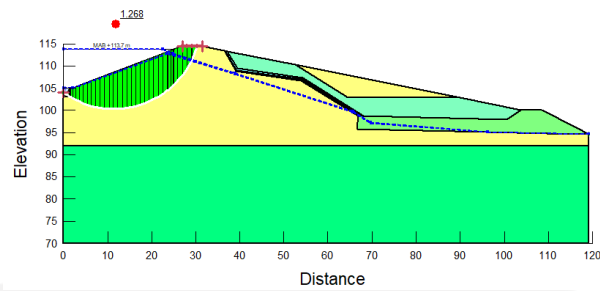
Kondisi surut cepat terjadi biasanya karena air turun pada elevasi tertentu secara cepat sehingga tekanan air pori pada lapisan tanah atas masih ada. Pada kondisi ini diasumsikan Kondisi awal pada keadaan MAB yang kemudian surut pada kondisi MAM. Hasil analisis kondisi surut cepat (*Rapid Draw Down*) di lereng hulu dan hilir dengan tanpa gempa, gempa OBE dan MDE dapat dilihat pada Gambar 5.23 sampai dengan Gambar 5.28. sebagai berikut.



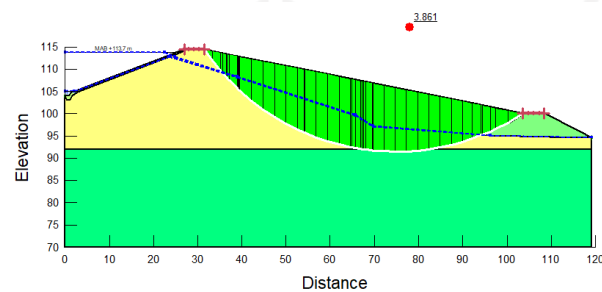
**Gambar 5. 27 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Surut Cepat (RDD) Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual**



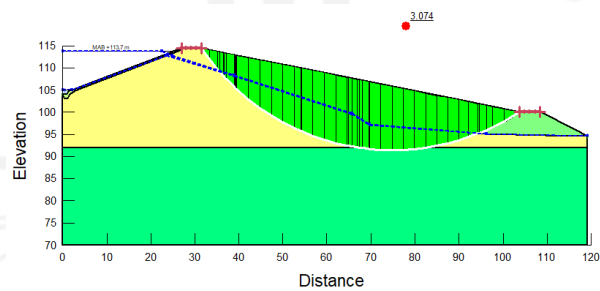
**Gambar 5. 28 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Surut Cepat (RDD) Dengan Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual**



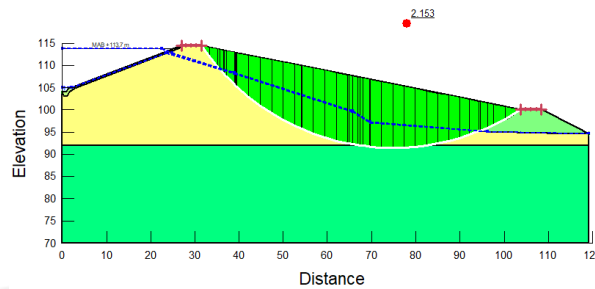
**Gambar 5. 29 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Surut Cepat (RDD) Dengan Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual**



**Gambar 5. 30 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Surut Cepat (RDD) Tanpa Gempa dengan Garis Freatik Manual**



**Gambar 5. 31 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Surut Cepat (RDD) Dengan Gempa OBE dengan Garis Freatik Manual**



**Gambar 5. 32 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Surut Cepat (RDD) Dengan Gempa MDE dengan Garis Freatik Manual**

#### **5.4.3. Stabilitas Lereng dengan Garis Freatik Output Seep/W**

Besarnya angka aman dari tubuh Bendungan Krisak dihitung dengan *software GeoStudio 2012 Slope/W* yang berbasis *finite element*. SLOPE/W merupakan program yang digunakan untuk analisis stabilitas lereng, baik tanah maupun batuan, termasuk galian dan timbunan. Pada analisis ini tipe analisis yang digunakan yaitu *ordinary (fellenius)* dan *slip surface* yang digunakan yaitu *entry-exit*. Parameter yang dibutuhkan pada analisis ini yaitu koefisien gempa dan data tanah berupa berat jenis tanah, kohesi dan sudut geser tanah. Tinjauan lereng yang dianalisis terdiri dari lereng hulu (*upstream*) dan lereng hilir (*downstream*) dengan 4 tinjauan keadaan situasi bendungan diantaranya sebagai berikut.

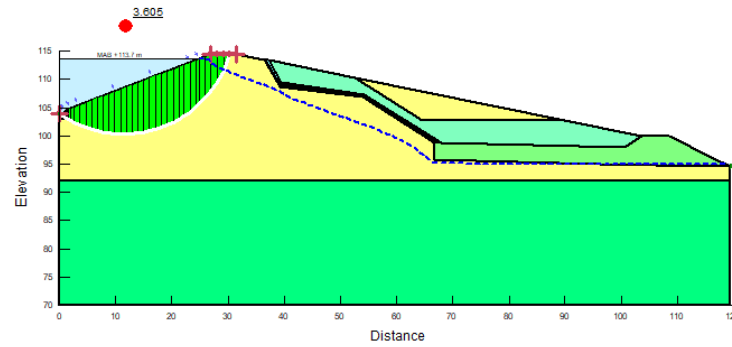
1. Muka air banjir.
2. Muka air normal.
3. Muka air minimum.
4. Surut cepat (*rapid drawdown*)

Pemodelan dilakukan di *Geostudio 2012 Slope/W* dengan menggunakan garis freatik dari output hasil perhitungan di *SEEP/W*, Hasil analisis keamanan stabilitas bendungan Krisak dengan beberapa kondisi dan data tanah yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan Geometri menggunakan Gambar 4.3.

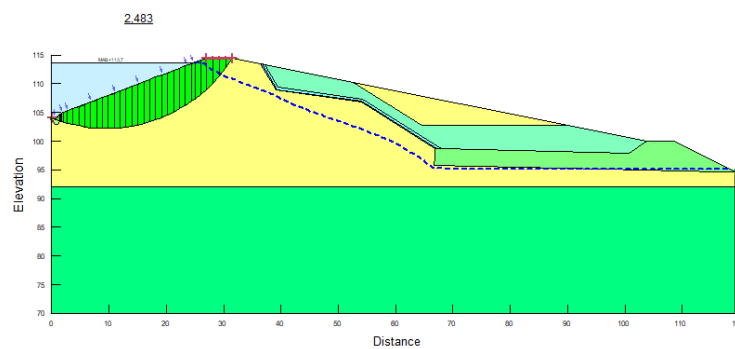
1. Kondisi Muka Air Banjir

Berdasarkan data teknis yang dapat dilihat pada Tabel 4.1, kondisi muka air banjir berada pada elevasi +113,75. Garis freatik menggunakan output dari

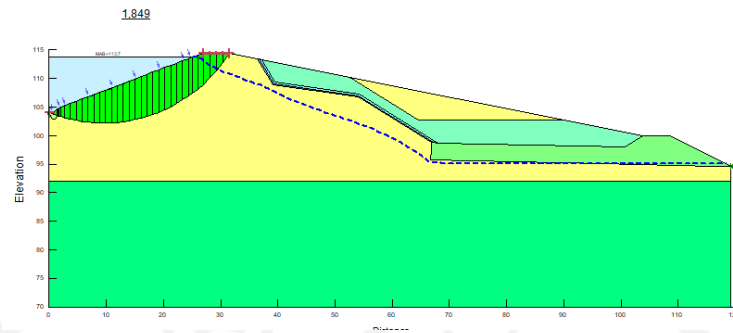
analisis menggunakan SEEP/W. Hasil analisis kondisi muka air banjir di lereng hulu dan hilir dengan tanpa gempa, gempa OBE dan MDE dapat dilihat pada Gambar 5.5 sampai dengan Gambar 5.10. sebagai berikut.



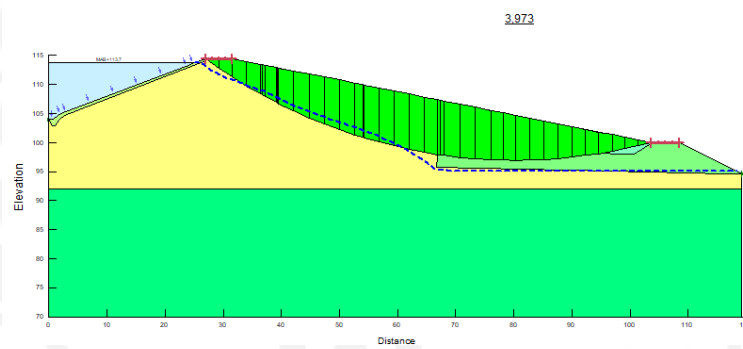
**Gambar 5. 33 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Banjir Tanpa Beban Gempa**



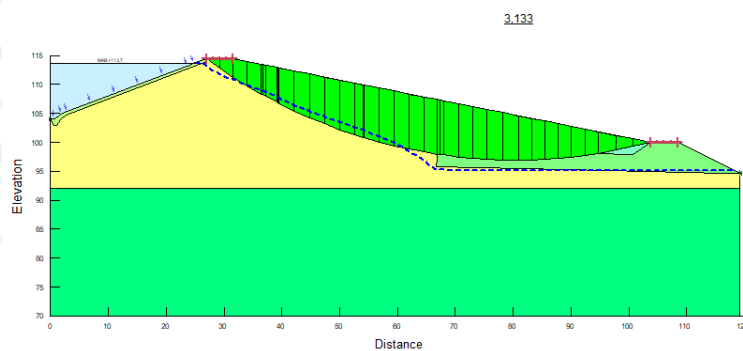
**Gambar 5. 34 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Banjir Dengan Beban Gempa OBE**



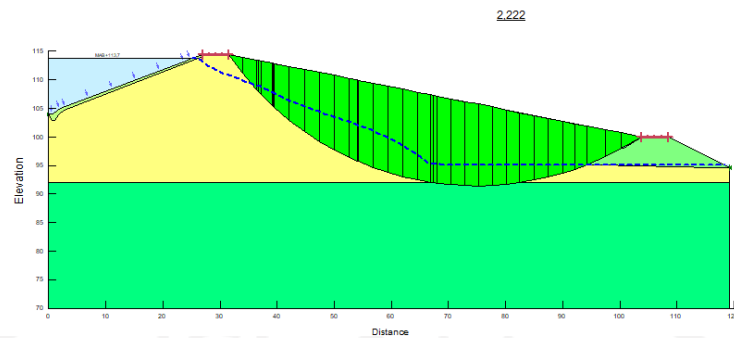
**Gambar 5. 35 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng  
Hulu Bendungan Muka Air Banjir Dengan Beban Gempa MDE**



**Gambar 5. 36 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng  
Hilir Bendungan Muka Air Banjir Tanpa Gempa**



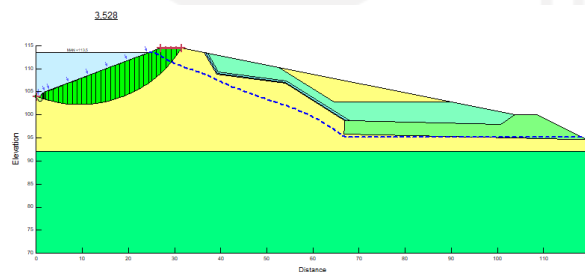
**Gambar 5. 37 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng  
Hilir Bendungan Muka Air Banjir Dengan Beban Gempa OBE**



**Gambar 5. 38 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Banjir Dengan Beban Gempa MDE**

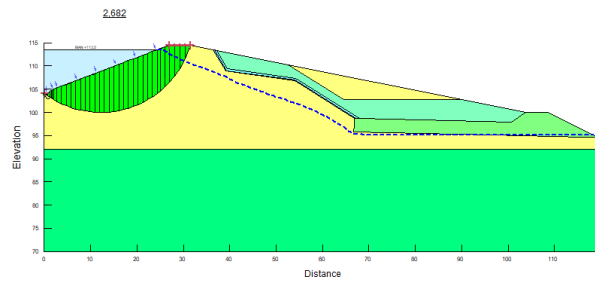
2. Kondisi Muka Air Normal

Berdasarkan data teknis yang dapat dilihat pada Tabel 4.1, kondisi muka air banjir berada pada elevasi +113,5. Garis freatik menggunakan output dari analisis menggunakan SEEP/W. Hasil analisis kondisi muka air normal di lereng hulu dan hilir dengan tanpa gempa, gempa OBE dan MDE dapat dilihat pada Gambar 5.X sampai dengan Gambar 5.11 sampai dengan Gambar 5.16 sebagai berikut.

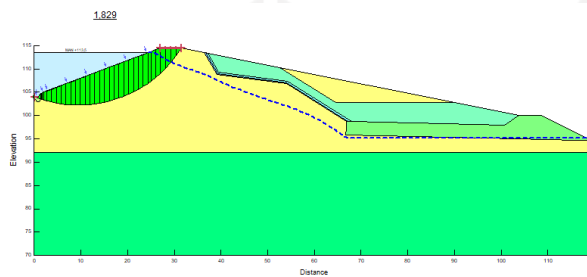


**Gambar 5. 39 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Normal Tanpa Gempa**

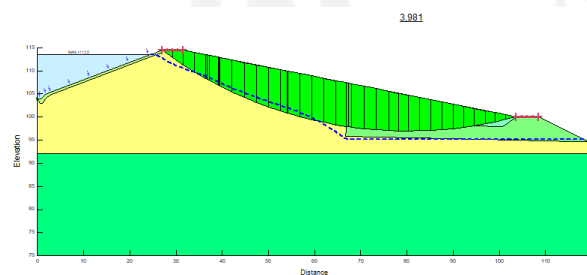




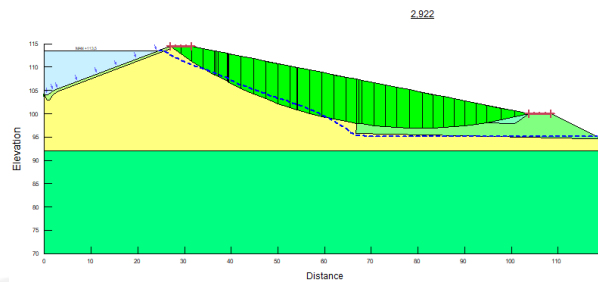
**Gambar 5. 40 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Normal Dengan Gempa OBE**



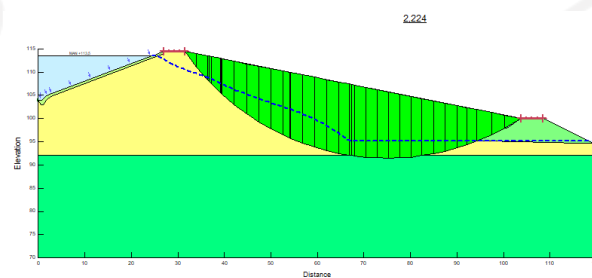
**Gambar 5. 41 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Normal Dengan Gempa MDE**



**Gambar 5. 42 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Normal Tanpa Gempa**



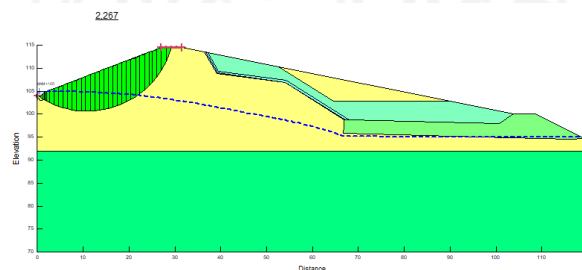
**Gambar 5. 43 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Normal Dengan Gempa OBE**



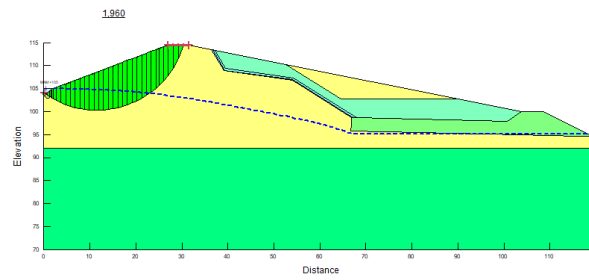
**Gambar 5. 44 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Normal Dengan Gempa MDE**

3. Kondisi Muka Air Minimum

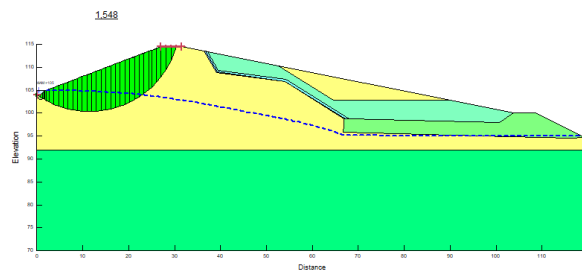
Berdasarkan data teknis yang dapat dilihat pada Tabel 4.1, kondisi muka air banjir berada pada elevasi +105. Garis freatik menggunakan output dari analisis menggunakan SEEP/W. Hasil analisis kondisi muka air minimum di lereng hulu dan hilir dengan tanpa gempa, gempa OBE dan MDE dapat dilihat pada Gambar 5.17 sampai dengan Gambar 5.22 sebagai berikut.



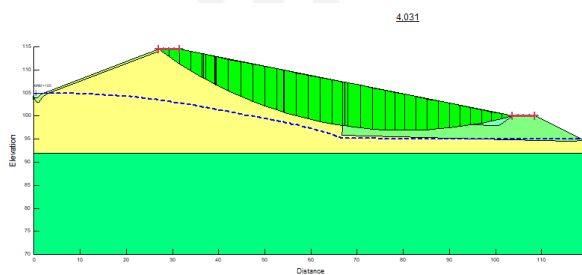
**Gambar 5. 45 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hulu Bendungan Muka Air Minimum Tanpa Gempa**



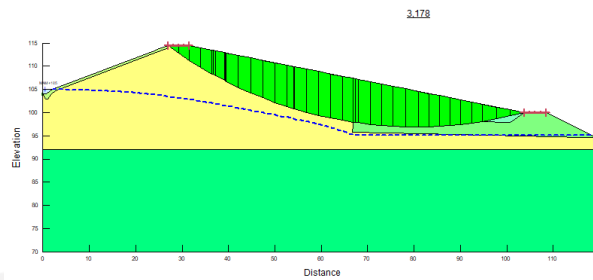
**Gambar 5. 46 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng  
Hulu Bendungan Muka Air Minimum Dengan Gempa OBE**



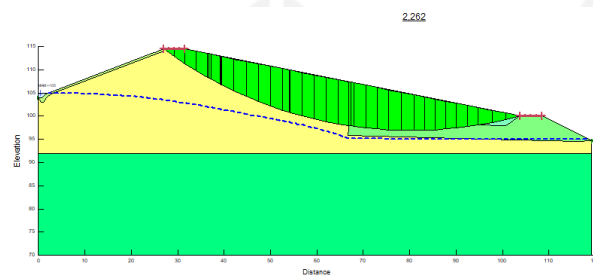
**Gambar 5. 47 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng  
Hulu Bendungan Muka Air Minimum Dengan Gempa MDE**



**Gambar 5. 48 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng  
Hilir Bendungan Muka Air Minimum Tanpa Gempa**



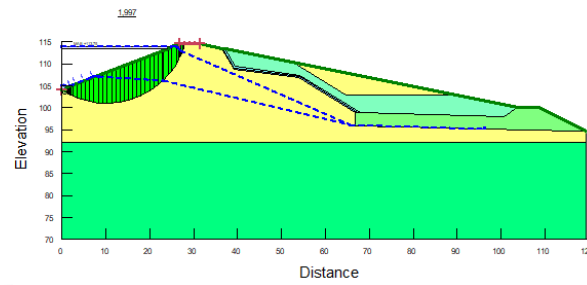
**Gambar 5. 49 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Minimum Dengan Gempa OBE**



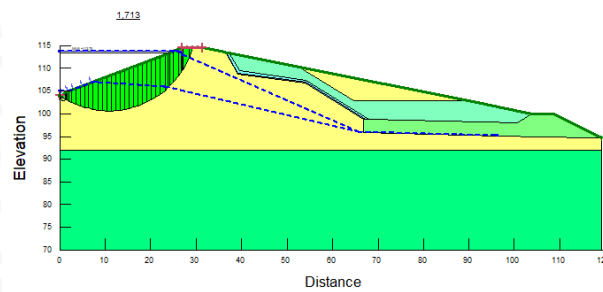
**Gambar 5. 50 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Muka Air Minimum Dengan Gempa MDE**

4. Kondisi Surut Cepat (*Rapid Draw Down*)

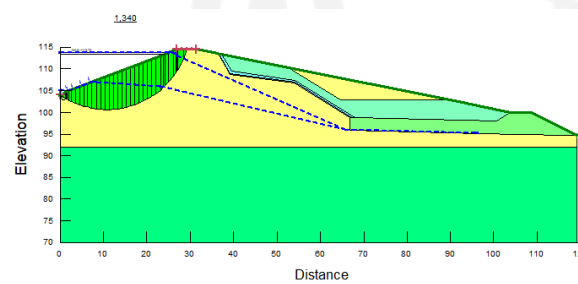
Kondisi surut cepat terjadi biasanya karena air turun pada elevasi tertentu secara cepat sehingga tekanan air pori pada lapisan tanah atas masih ada. Pada kondisi ini diasumsikan Kondisi awal pada keadaan MAB yang kemudian surut pada kondisi MAM. Hasil analisis kondisi surut cepat (*Rapid Draw Down*) di lereng hulu dan hilir dengan tanpa gempa, gempa OBE dan MDE dapat dilihat pada Gambar 5.23 sampai dengan Gambar 5.28. sebagai berikut.



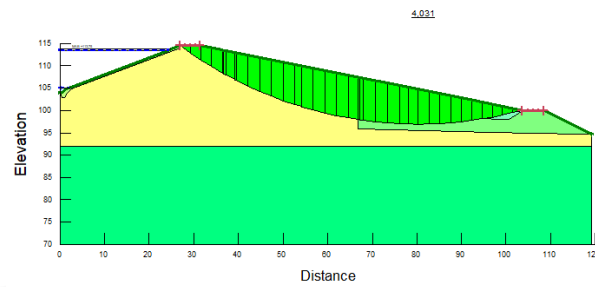
**Gambar 5. 51 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng  
Hulu Bendungan Surut Cepat (RDD) Tanpa Gempa**



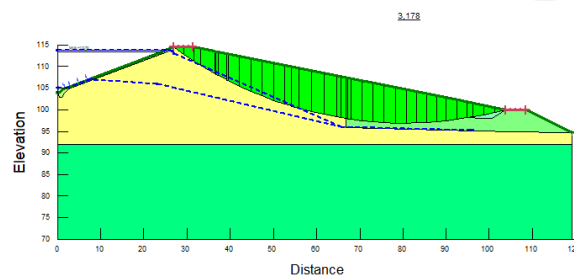
**Gambar 5. 52 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng  
Hulu Bendungan Surut Cepat (RDD) Dengan Gempa OBE**



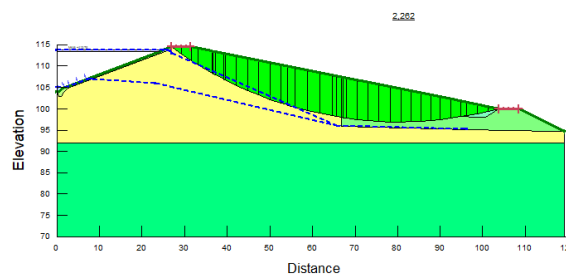
**Gambar 5. 53 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng  
Hulu Bendungan Surut Cepat (RDD) Dengan Gempa MDE**



**Gambar 5. 54 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Surut Cepat (RDD) Tanpa Gempa**



**Gambar 5. 55 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Surut Cepat (RDD) Dengan Gempa OBE**



**Gambar 5. 56 Output Running GeoStudio 2012 Slope/W Stabilitas Lereng Hilir Bendungan Surut Cepat (RDD) Dengan Gempa MDE**

## 5.5. Pembahasan

### 5.5.1. Pembahasan Rembesaan

#### 1. Debit Rembesan

Rekapitulasi hasil perhitungan rembesan menggunakan *software GeoStudio 2012 Seep/W* dapat dilihat pada Tabel 5.5. Panjang bendungan Krisak berdasarkan data teknis sebesar 350 m, sehingga rembesan dapat dikalikan dengan Panjang Rembesan. berikut ini.

**Tabel 5. 6 Rekapitulasi Hasil Rembesan Bendungan Krisak**

NO	Situasi	Hitungan Manual			Hitungan SEEP/W		
		Rembesan		Rembesan Total	Rembesan Total		Rembesan Total
		m <sup>3</sup> /s	l/s	l/s	l/s	m <sup>3</sup> /s	l/s
1	Muka air banjir (MAB)	0.00000833	0.00833	2.9155	0,0000634	0,0634	22,19
2	Muka air normal (MAB)	0.000000733	0.000733	0.25655	0,0000625	0,0625	21,87
3	Muka air minimum (MAM)	0.000000205	0.000205	0.07175	0,0000336	0,0336	11,76

Berdasarkan Pedoman *Grouting* Untuk Bendungan Departemen Pekerjaan Umum-SDA besarnya 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. Nilai rata-rata debit sungai pada bendungan Krisak sebesar 3,8 m<sup>3</sup>/s sehingga nilai 1% dari debit rata-rata debit sungai sebesar 0,038 m<sup>3</sup>/s atau setara dengan 38 l/s . Rembesan total maksimum yang terjadi yaitu sebesar 22,19 l/s berdasarkan hitungan dari SEEP/W. Sehingga dapat disimpulkan stabilitas rembesan berstatus aman karena nilai rembesannya lebih kecil dari 1% debit rata-rata sungai. Rembesan terbesar terjadi saat kondisi MAB dengan ( $Q_{\text{rembesan}} = 22,19 \text{ l/s} < Q_{\text{syarat}} = 38 \text{ l/s}$ ).

## 2. Gradien Hidraulik

Keamanan bendungan terhadap piping, nilai faktor keamanan bendungan harus lebih besar dari 3 sampai 4 pada perbandingan antara nilai gradien hidrolik kritis dengan gradien keluar maksimum. ( $\frac{i_c}{i_e} > 3$  s/d 4). Berdasarkan hasil perhitungan berikut ini hasil rekapitulasi dan status keamanan dapat dilihat pada Tabel 5.6 sebagai berikut.

**Tabel 5. 7 Rekapitulasi Perhitungan Gradien Hidraulik**

No	Kondisi	TMA (m)	$\frac{i_c}{i_e}$	Syarat	Status
1	MAB	113,75	4,55	3	Aman
2	MAN	113,75	4,64	3	Aman
3	MAM	105,00	10,11	3	Aman

## 5.5.2. Stabilitas Lereng

### 1. Rekapitulasi Stabilitas Lereng dengan Garis Freatik Perhitungan Manual.

Pada hasil analisis menggunakan *GeoStudio 2012 Slope/W* dengan garis freatik perhitungan manual., angka kermanan untuk stabilitas lereng tubuh bendungan dengan tinjauan 4 kondisi dapat dilihat pada Tabel diatas . Hasil keamanan yang didapatkan dalam status AMAN semua sesuai dengan syarat standar keamana lereng tubuh bendungan seperti yang disyaratkan dalam : SNI 8064:2012 dan Pedoman Kontrusksi Dan Bangunan Analisis Dinamik Bendungan Urugan atau dapat dilihat pada Tabel 3.10. Dari Hasil analisis geostudio berikut ini rekapitulasi perhitungannya yang dapat dilihat pada Tabel 5.7 dan Tabel 5.8 sebagai berikut.

**Tabel 5. 8 Hasil Rekapitulasi Stabilitas Lereng Keadaan OBE Bendungan Krisak dengan Garis Freatik Perhitungan Manual**

No	Situasi	U/D	TANPA GEMPA			GEMPA TERMODIFIKASI		
			Tanpa Gempa	Syarat	Status	Gempa	Syarat	Status
1	Muka Air Banjir	U	3.437	1,5	AMAN	2.520	1,2	AMAN
		D	3.783	1,5	AMAN	3.057	1,2	AMAN
2	Muka Air Normal	U	3.333	1,5	AMAN	2.473	1,2	AMAN
		D	3.745	1,5	AMAN	3.028	1,2	AMAN
3	Muka Air Minimum	U	2.256	1,5	AMAN	1.939	1,2	AMAN
		D	3.994	1,5	AMAN	3.177	1,2	AMAN



No	Situasi	U/D	TANPA GEMPA			GEMPA TERMODIFIKASI		
			Tanpa Gempa	Syarat	Status	Gempa	Syarat	Status
4	Surut Cepat (RDD)	U	1.843	1,3	AMAN	1,604	1,1	AMAN
		D	3.861	1,3	AMAN	3,074	1,1	AMAN

**Tabel 5. 9 Hasil Rekapitulasi Stabilitas Lereng Keadaan MDE Bendungan Krisak dengan Garis Freatik Perhitungan Manual**

No	Situasi	U/D	GEMPA TERMODIFIKASI		
			Gempa	Syarat	Status
1	Muka Air Banjir	U	1.751	1	AMAN
		D	2.147	1	AMAN
2	Muka Air Normal	U	1.724	1	AMAN
		D	2.121	1	AMAN
3	Muka Air Minimum	U	1.539	1	AMAN
		D	2.226	1	AMAN
4	Surut Cepat (RDD)	U	1.268	1	AMAN
		D	2,153	1	AMAN

2. Rekapitulasi Stabilitas Lereng dengan Garis Freatik Output Seep/W

Pada hasil analisis menggunakan *GeoStudio 2012 Slope/W*, angka keamanan untuk stabilitas lereng tubuh bendungan dengan tinjauan 4 kondisi dapat dilihat pada Tabel diatas . Hasil keamanan yang didapatkan dalam status AMAN semua sesuai dengan syarat standar keamanan lereng tubuh bendungan seperti yang disyaratkan dalam : SNI 8064:2012 dan Pedoman Konstruksi Dan Bangunan Analisis Dinamik Bendungan Urugan atau dapat dilihat pada Tabel 3.10. Dari Hasil analisis geostudio berikut ini rekapitulasi perhitungannya yang dapat dilihat pada Tabel 5.7 dan Tabel 5.8 sebagai berikut.

**Tabel 5. 10 Hasil Rekapitulasi Stabilitas Lereng Keadaan OBE Bendungan Krisak Garis Freatik Output Seep/W**

No	Situasi	U/D	TANPA GEMPA			GEMPA TERMODIFIKASI		
			Tanpa Gempa	Syarat	Status	Gempa	Syarat	Status
1	Muka Air Banjir	U	3,605	1,5	AMAN	2,483	1,2	AMAN
		D	3,973	1,5	AMAN	3,133	1,2	AMAN
2	Muka Air	U	3,528	1,5	AMAN	2,682	1,2	AMAN

	Normal	D	3,981	1,5	AMAN	2,992	1,2	AMAN
3	Muka Air Minimum	U	2,267	1,5	AMAN	1,960	1,2	AMAN
		D	4,030	1,5	AMAN	3,178	1,2	AMAN
4	Surut Cepat (RDD)	U	1,997	1,3	AMAN	1,713	1,1	AMAN
		D	4,030	1,3	AMAN	3,178	1,1	AMAN

**Tabel 5. 11 Hasil Rekapitulasi Stabilitas Lereng Keadaan MDE Bendungan Krisak Garis Freatik Output Seep/W**

No	Situasi	U/D	GEMPA TERMODIFIKASI		
			Gempa	Syarat	Status
1	Muka Air Banjir	U	1,849	1	AMAN
		D	2,222	1	AMAN
2	Muka Air Normal	U	1,829	1	AMAN
		D	2,224	1	AMAN
3	Muka Air Minimum	U	1,548	1	AMAN
		D	2,620	1	AMAN
4	Surut Cepat (RDD)	U	1,340	1	AMAN
		D	2,262	1	AMAN

## BAB VI

### PENUTUP

#### 6.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan pembahasan mengenai keamanan struktur tubuh Bendungan Krisak, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Pada kondisi muka air banjir Bendungan Krisak berdasarkan hasil analisis program GeoStudio 2012 rembesan yang terjadi dalam kondisi aman, dimana nilai debit rembesan sebesar 22,19 l/s lebih besar dari syarat yang ditentukan sebesar 38 l/s ( $Q_{\text{rembesan}} = 22,19 \text{ l/s} < Q_{\text{syarat}} = 38 \text{ l/s}$ ) dan Nilai gradien Hidraulik ( $\frac{i_c}{i_e}$ ) sebesar 4,55 lebih besar dari syarat yaitu 3. Pada stabilitas lereng tubuh bendungan kondisi tanpa gempa dalam kondisi aman, nilai Faktor keamanan (FK) lereng hulu sebesar 3,605 lebih besar dari syarat yaitu 1,5 ( $FK = 3,605 > 1,5$ ), nilai faktor keamanan (FK) lereng hilir sebesar 3,973 lebih besar dari syarat yaitu 1,5 ( $FK = 3,973 > 1,5$ ). Pada stabilitas lereng tubuh bendungan kondisi gempa OBE dalam kondisi aman, nilai Faktor keamanan (FK) lereng hulu sebesar 2,483 lebih besar dari syarat yaitu 1,2 ( $FK = 2,483 > 1,2$ ), nilai faktor keamanan (FK) lereng hilir sebesar 3,133 lebih besar dari syarat yaitu 1,2 ( $FK = 3,133 > 1,2$ ). Pada stabilitas lereng tubuh bendungan kondisi gempa MDE dalam kondisi aman, nilai Faktor keamanan (FK) lereng hulu sebesar 1,849 lebih besar dari syarat yaitu 1,00 ( $FK = 1,849 > 1,00$ ), nilai faktor keamanan (FK) lereng hilir sebesar 2,22 lebih besar dari syarat yaitu 1,00 ( $FK = 2,22 > 1,00$ ).
2. Pada kondisi muka air normal Bendungan Krisak berdasarkan hasil analisis program GeoStudio 2012 rembesan yang terjadi dalam kondisi aman, dimana nilai debit rembesan sebesar 21,87 l/s lebih besar dari syarat yang ditentukan sebesar 38 l/s ( $Q_{\text{rembesan}} = 21,87 \text{ l/s} < Q_{\text{syarat}} = 38 \text{ l/s}$ ) dan Nilai gradien Hidraulik ( $\frac{i_c}{i_e}$ ) sebesar 4,64 lebih besar dari syarat yaitu 3. Pada stabilitas lereng tubuh bendungan kondisi tanpa gempa dalam kondisi aman,

nilai Faktor keamanan (FK) lereng hulu sebesar 3,528 lebih besar dari syarat yaitu 1,5 ( $FK = 3,528 > 1,5$ ), nilai faktor keamanan (FK) lereng hilir sebesar 3,981 lebih besar dari syarat yaitu 1,5 ( $FK = 3,981 > 1,5$ ). Pada stabilitas lereng tubuh bendungan kondisi gempa OBE dalam kondisi aman, nilai Faktor keamanan (FK) lereng hulu sebesar 2,628 lebih besar dari syarat yaitu 1,2 ( $FK = 2,628 > 1,2$ ), nilai faktor keamanan (FK) lereng hilir sebesar 2,992 lebih besar dari syarat yaitu 1,2 ( $FK = 2,992 > 1,2$ ). Pada stabilitas lereng tubuh bendungan kondisi gempa MDE dalam kondisi aman, nilai Faktor keamanan (FK) lereng hulu sebesar 1,829 lebih besar dari syarat yaitu 1,00 ( $FK = 1,829 > 1,00$ ), nilai faktor keamanan (FK) lereng hilir sebesar 2,224 lebih besar dari syarat yaitu 1,00 ( $FK = 2,224 > 1,00$ ).

3. Pada kondisi muka air normal Bendungan Krisak berdasarkan hasil analisis program GeoStudio 2012 rembesan yang terjadi dalam kondisi aman, dimana nilai debit rembesan sebesar 11,76 l/s lebih besar dari syarat yang ditentukan sebesar 38 l/s ( $Q_{\text{rembesan}} = 11,79 \text{ l/s} < Q_{\text{syarat}} = 38 \text{ l/s}$ ) dan Nilai gradien Hidraulik ( $\frac{i_c}{i_e}$ ) sebesar 10,11 lebih besar dari syarat yaitu 3. Pada stabilitas lereng tubuh bendungan kondisi tanpa gempa dalam kondisi aman, nilai Faktor keamanan (FK) lereng hulu sebesar 2,267 lebih besar dari syarat yaitu 1,5 ( $FK = 2,267 > 1,5$ ), nilai faktor keamanan (FK) lereng hilir sebesar 4,030 lebih besar dari syarat yaitu 1,5 ( $FK = 4,030 > 1,5$ ). Pada stabilitas lereng tubuh bendungan kondisi gempa OBE dalam kondisi aman, nilai Faktor keamanan (FK) lereng hulu sebesar 1,960 lebih besar dari syarat yaitu 1,2 ( $FK = 1,960 > 1,2$ ), nilai faktor keamanan (FK) lereng hilir sebesar 3,178 lebih besar dari syarat yaitu 1,2 ( $FK = 3,178 > 1,2$ ). Pada stabilitas lereng tubuh bendungan kondisi gempa MDE dalam kondisi aman, nilai Faktor keamanan (FK) lereng hulu sebesar 1,548 lebih besar dari syarat yaitu 1,00 ( $FK = 1,548 > 1,00$ ), nilai faktor keamanan (FK) lereng hilir sebesar 2,262 lebih besar dari syarat yaitu 1,00 ( $FK = 2,262 > 1,00$ ).
4. Pada kondisi surut cepat Bendungan Krisak berdasarkan hasil analisis program GeoStudio 2012 stabilitas lereng tubuh bendungan kondisi tanpa

gempa dalam kondisi aman, nilai Faktor keamanan (FK) lereng hulu sebesar 1,997 lebih besar dari syarat yaitu 1,3 ( $FK = 1,997 > 1,3$ ), nilai faktor keamanan (FK) lereng hilir sebesar 4,030 lebih besar dari syarat yaitu 1,5 ( $FK = 4,030 > 1,3$ ). Pada stabilitas lereng tubuh bendungan kondisi gempa OBE dalam kondisi aman, nilai Faktor keamanan (FK) lereng hulu sebesar 1,713 lebih besar dari syarat yaitu 1,1 ( $FK = 1,713 > 1,1$ ), nilai faktor keamanan (FK) lereng hilir sebesar 3,178 lebih besar dari syarat yaitu 1,1 ( $FK = 3,178 > 1,1$ ). Pada stabilitas lereng tubuh bendungan kondisi gempa MDE dalam kondisi aman, nilai Faktor keamanan (FK) lereng hulu sebesar 1,340 lebih besar dari syarat yaitu 1,00 ( $FK = 1,340 > 1,00$ ), nilai faktor keamanan (FK) lereng hilir sebesar 2,262 lebih besar dari syarat yaitu 1,00 ( $FK = 2,262 > 1,00$ ).

## 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 software dengan hasil pembacaan V-notch di lapangan.
2. Perlu dilakukan analisis stabilitas dengan menggunakan data pembacaan piezometer di lapangan sebagai garis freatik.
3. Pada penelitian selanjutnya, perlu dilakukan dengan menggunakan software lain seperti plaxis, Geo5, Abaqus atau software lainnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad. (2014). *Pengamatan GPS Untuk Monitoring Deformasi Bendungan Jatibarang Menggunakan Software Gamit 10.5*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Azis. (2011). *Analisis Model Hubungan Komitmen dan Sikap Pada Jabatan Terhadap Kinerja Dosen Melalui Kepemimpinan Visioner Ketua Program Studi Universitas Muria Kudus*. Kudus: Universitas Muria Kudus.
- Bentara, I. A. (2021). *Analisis Stabilitas Tubuh Bendungan Dawuhan*. Yogyakarta: 2021.
- Direktur Jenderal Sumber Daya Air. (2008). *Pedoman Kontruksi dan Bangunan : Analisis Dinamik Bendungan Urugan*. Jakarta: Puslitbang Kementerian PUPR.
- Direktur Jendral Sumber Daya Air. (2005). *Pedoman Grouting Untuk Bendungan*. Jakarta: Puslitbang Kementerian PUPR.
- Fata, Y. A. (2018). *Analisis Stabilitas Lereng Bendungan Sutami Berdasarkan Peta Gempa 2017*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah II*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Khadafi. (2015). *Strategi Bersaing dalam Meningkatkan Jumlah Pelanggan : Studi Kasus Pada Perusahaan Otobus Al-Mubarak Malang*. Malang: Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.
- Konsultan Perencana. (2019). *Laporan Inspeksi Besar*. Yogyakarta.
- Konsultan Perencana. (2020). *Laporan Inspeksi Besar Bendungan Krisak*. Yogyakarta.
- Mubtadi, B. I. (2011). Peran Studi Pustaka Dalam Penelitian dan Penulisan Karya Ilmiah. *Politeknosains VOL. X NO. 1*, 69-79.
- Permen PUPR RI NO 27/PRT/M/2015. (2015). *Bendungan*. Jakarta: Kementerian PUPR RI.
- Purwanto, E. (2014). Nilai Modulus Geser Tanah Berdasarkan Rumus Hardin dan Drnevcih (1972) dan Menrd (1965) dari Uji Laboratorium. *Jurnal Teknik Sipil*.
- Putra, T. G. (2016). Analisis Stabilitas Lereng Pada Bendungan Titab. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Vol.20 No.1*, 13-14.

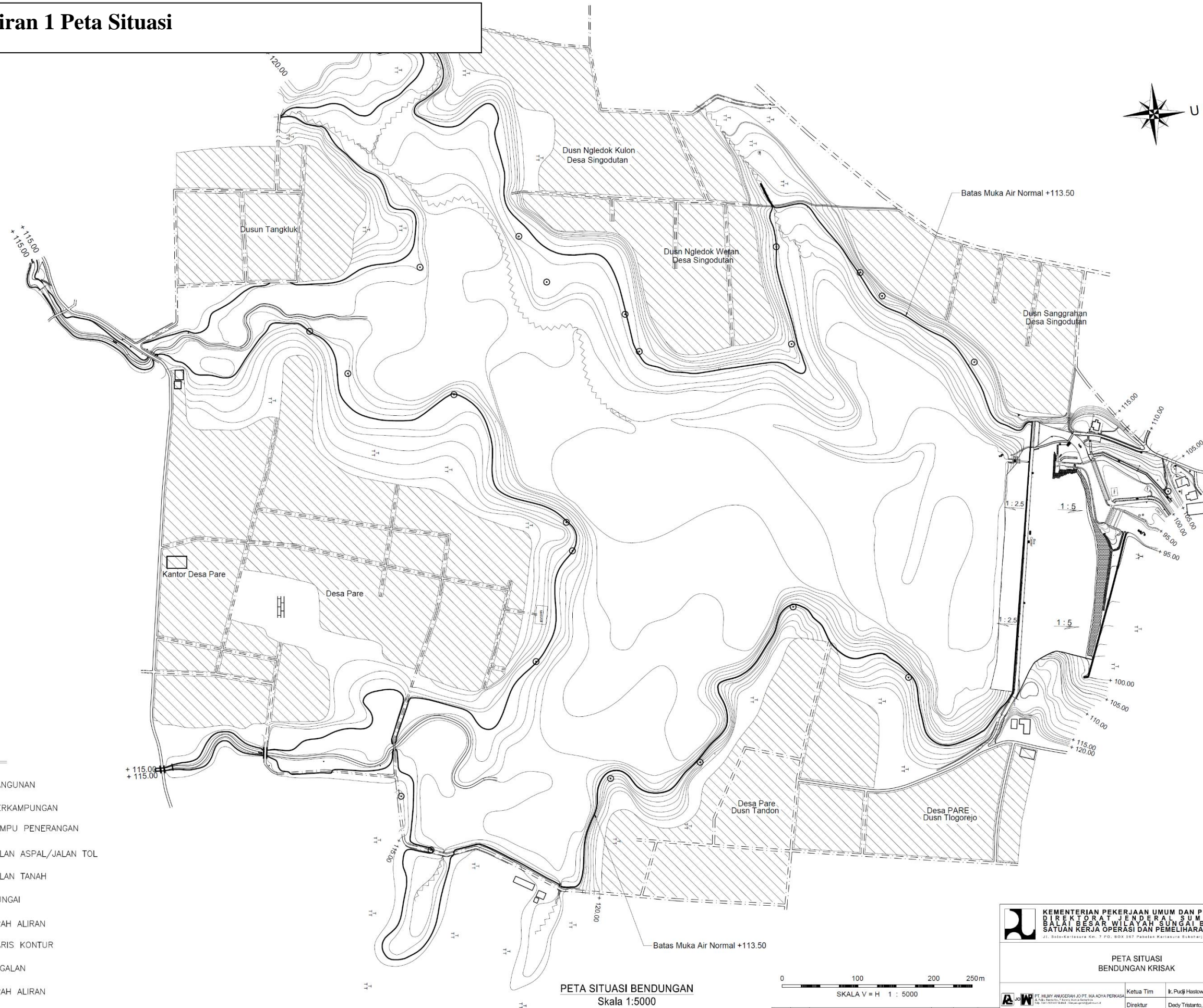
- Saidillah. (2021). *Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Saradan*. Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia.
- Sandi, I. K. (2021). *Analisis Stabilitas Tubuh Bendungan Menggunakan Metode Bishop Dan Perhitungan Rembesan Dengan Pendekatan Metode Cassagrande (Studi Kasus: Bendungan Pondok, Kabupaten Ngawi, Jawa Timur)*. Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia.
- Setiawan, I. (2021). *Analisis Keamanan Struktur Bendungan Gonggang Akibat Simulasi Beban Gempa*. Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia.
- SNI 8064 : 2012. (n.d.). *Metode Analisis Stabilitas Lereng Bendungan Tipe Urugan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 8460:2017. (n.d.). *Persyaratan Perencanaan Georteknik*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Soediby. (2003). *Teknik Bendungan*. Jakarta: PT Pradnya Paramita.
- Zainudin. (2010). *Pengaturan dan Konsep Keamanan Bendungan*. Jakarta: Puslitbang Kementerian PUPR.



# LAMPIRAN



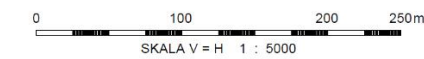
# Lampiran 1 Peta Situasi



## LEGENDA

-  BANGUNAN
-  PERKAMPUNGAN
-  LAMPU PENERANGAN
-  JALAN ASPAL/JALAN TOL
-  JALAN TANAH
-  SUNGAI
-  ARAH ALIRAN
-  GARIS KONTUR
-  TEGALAN
-  ARAH ALIRAN

PETA SITUASI BENDUNGAN  
Skala 1:5000

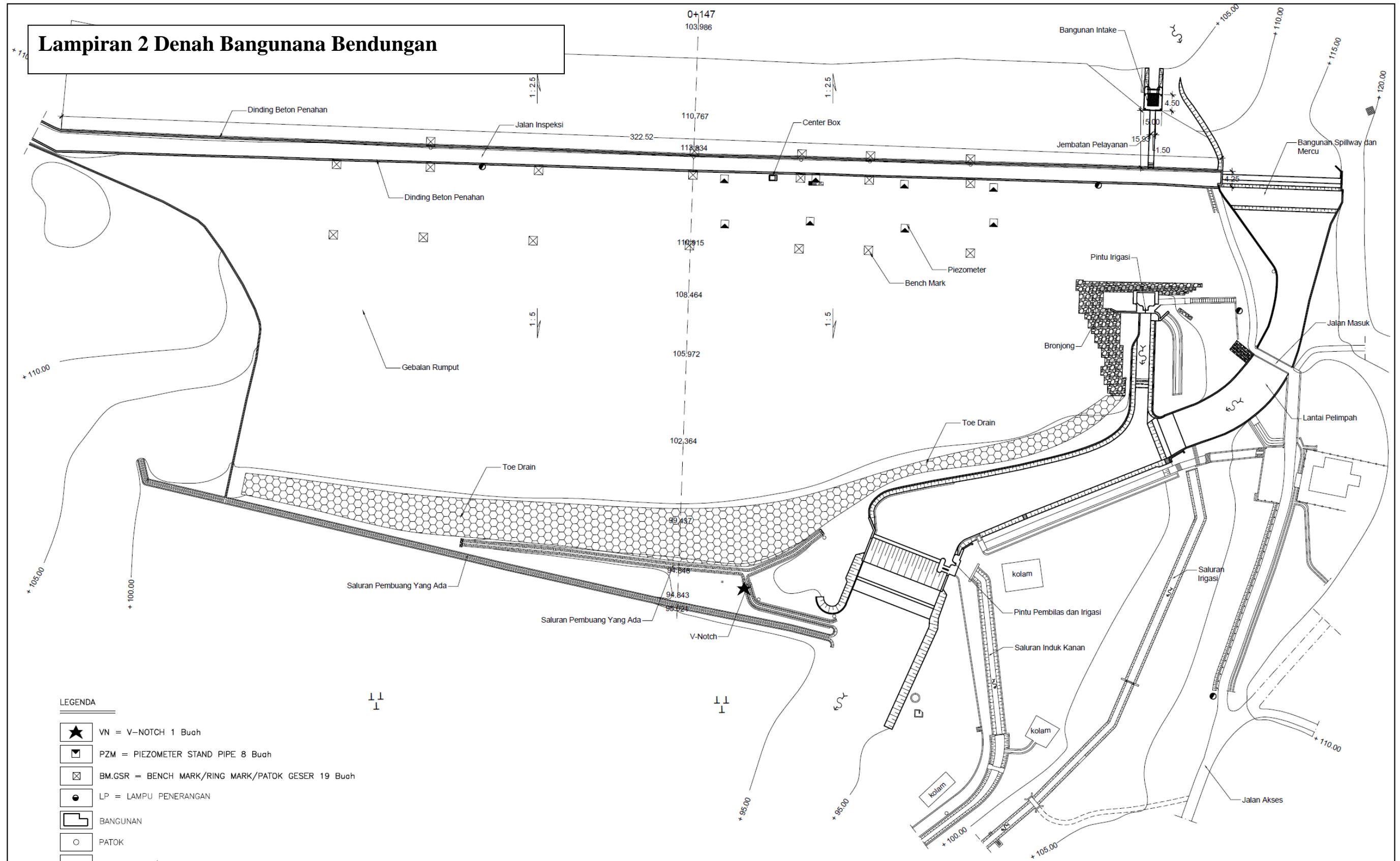


No. rev.	Tgl.	Yang Direvisi	Oleh	Direnc.	Disetujui

 PT. ILMU ANUGERAH JO PT. IRA ADYA PERKASA Jl. Sekeloa Selatan 1, P.O. BOX 267, Pabelan, Kartasura Sukoharjo 57162, Telp. Fax (0271) 711342	KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT DIREKTORAT JENDERAL SUMBER DAYA AIR BALAI BESAR WILAYAH SUNGAI BENGAWAN SOLO SATUAN KERJA OPERASI DAN PEMELIHARAAN BENGAWAN SOLO	Provinsi : Jawa Tengah, Jawa Timur PENYAPAN DAN PENETAPAN LINI OPERASI BENDUNGAN DAMUHAN, KRISAK DAN GONGGANG
	Ketua Tim : Ir. Pujji Hastowo, Dipl., HE. Direktur : Dedy Triyanto, ST.	Lokasi Pekerjaan : Kib. Madury, Magetan dan Wonorejo No. Lembar : No. Register : Nomor Kontrak :
Diperiksa : Menyetujui :	Direksi Pekerjaan : Sri Wahyu Kusumastuti, ST., MSI PPK Operasi dan Pemeliharaan SDA I : Ratih Nilam Sari, ST., MPSDA	HK.02.03/OPSDA/DOI/SP-II/2019-3 Tanggal 9 Oktober 2019



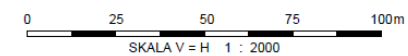
# Lampiran 2 Denah Bangunan Bendungan



**LEGENDA**

- VN = V-NOTCH 1 Buah
- PZM = PIEZOMETER STAND PIPE 8 Buah
- BM.GSR = BENCH MARK/RING MARK/PATOK GESER 19 Buah
- LP = LAMPU PENERANGAN
- BANGUNAN
- PATOK
- JALAN ASPAL/JALAN TOL
- JALAN TANAH
- ARAH ALIRAN
- GARIS KONTUR
- TEGALAN

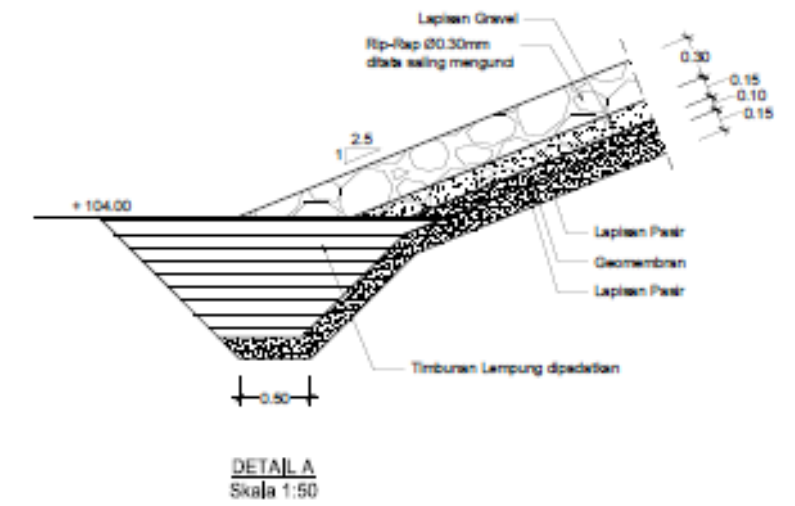
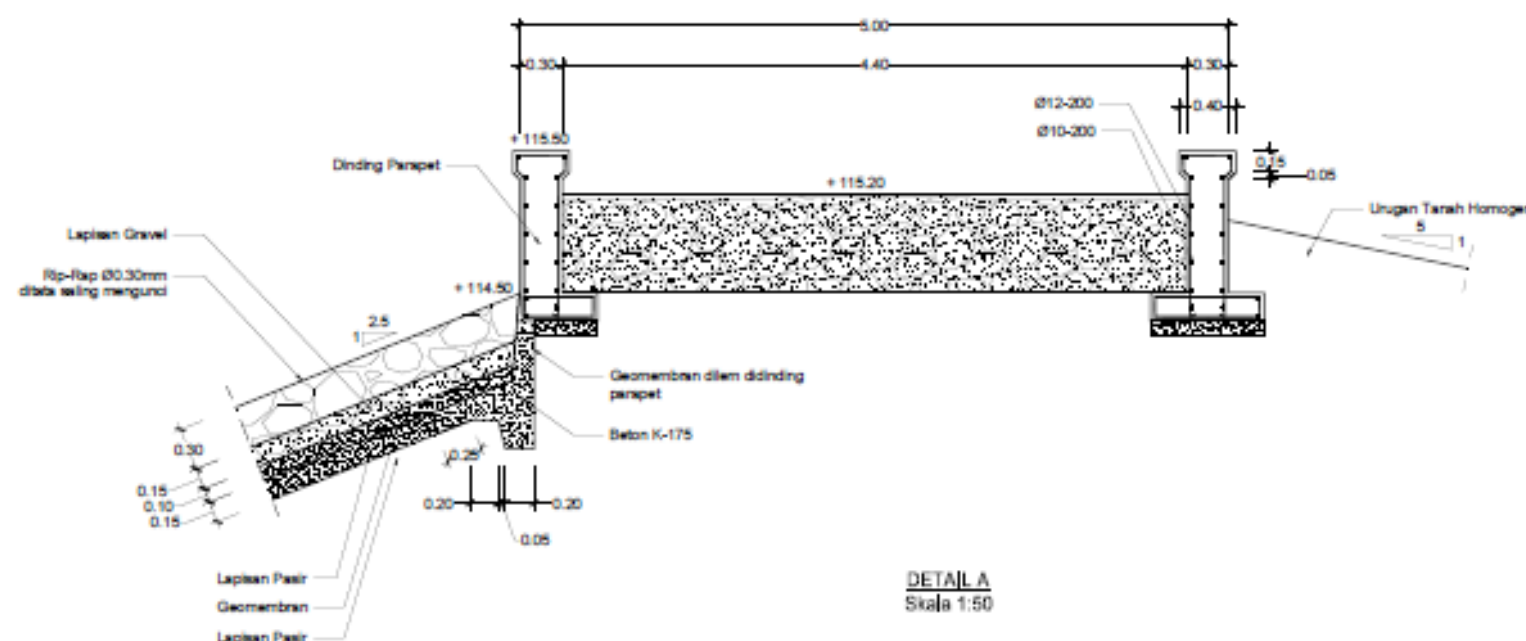
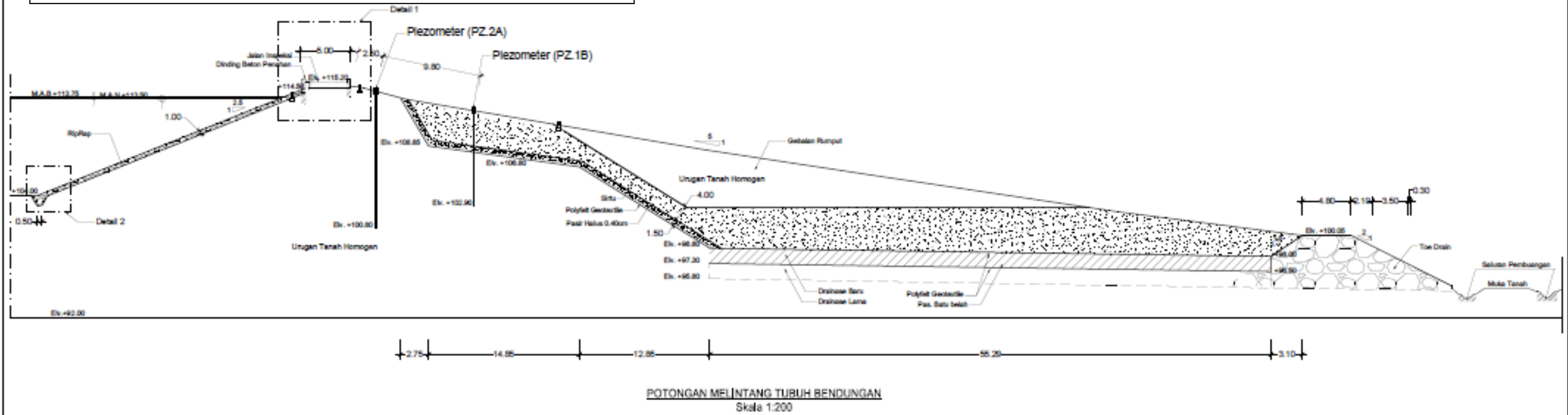
**DENAH BANGUNAN BENDUNGAN**  
Skala 1:2000



No. rev.	Tgl.	Yang Direvisi	Oleh	Direnc.	Disetujui

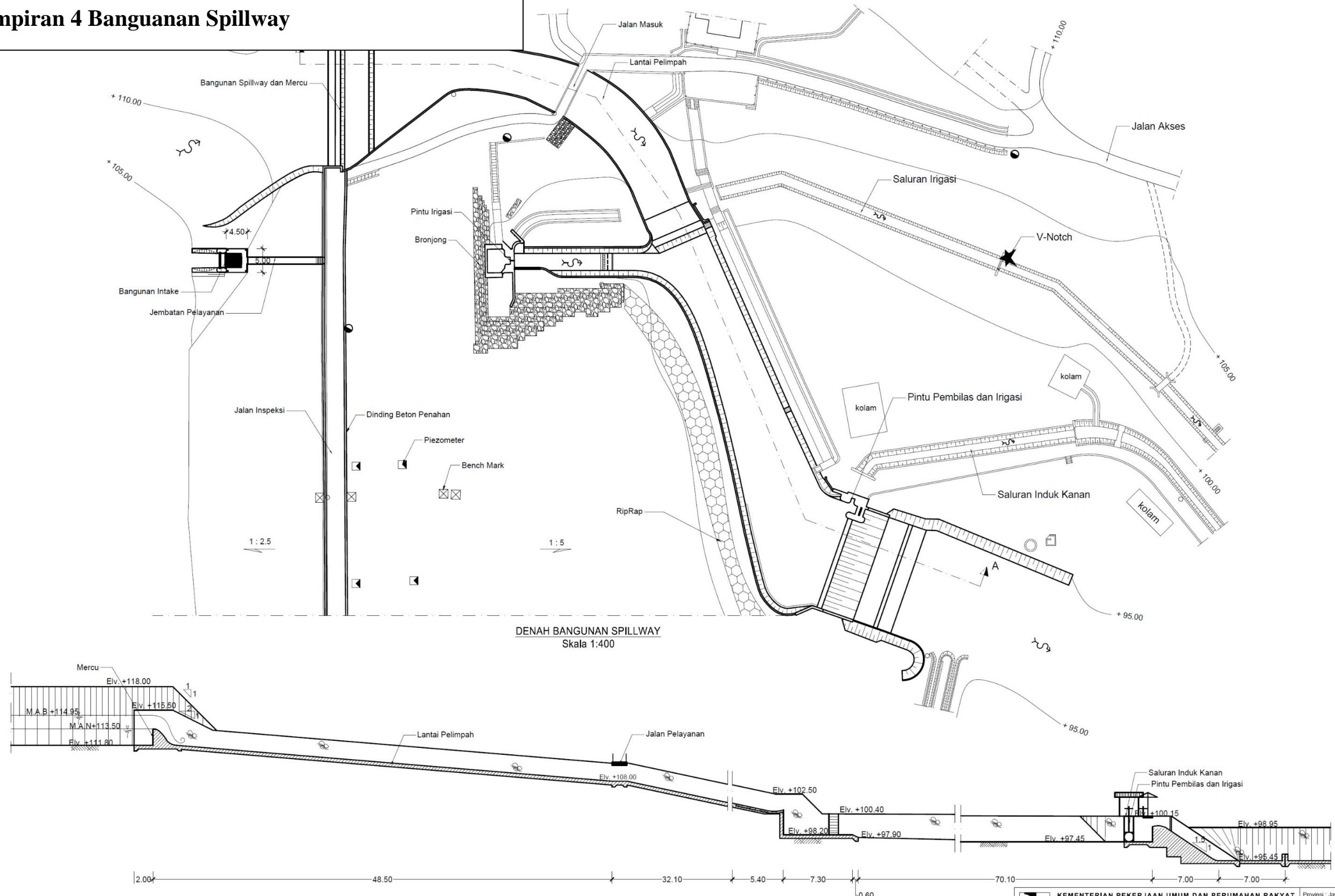
	<b>KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT</b> DIREKTORAT JENDERAL SUMBER DAYA AIR BALAI BESAR WILAYAH SUNGAI BENGAWAN SOLO SATUAN KERJA OPERASI DAN PEMELIHARAAN BENGAWAN SOLO <small>(Jl. Solo-Klaten Km. 7, P.O. BOX 387 Padalaran Karanganyar 57182, Telp./Fax (0271) 711143)</small>		Provinsi : Jawa Tengah, Jawa Timur
	<b>DENAH BANGUNAN BENDUNGAN KRISAK</b>		PENYIAPAN DAN PENETAPAN LINTAS OPERASI BENDUNGAN DAMUAN, KRISAK DAN GONGGANG
Lokasi Pekerjaan : Kab. Magelang, Magelang dan Wonorejo			No. Lembar :
No. Register :			Nomor Kontrak :
Dikerjakan oleh PT. PELAYANAN AIR RIWAYAT		Ketua Tim : Ii, Puji Hastono, Didi, HE,	HK.02.03/OPSDA/DOISP-02019-3 Tanggal 9 Oktober 2019
Direksi Pekerjaan		Direktur : Dedy Triyanto, ST,	
Menyetujui : PPK Operasi dan Pemeliharaan SDA I		Sri Wahyu Kusumastuti, ST., MSI	Rathi Nilam Sari, ST., MPSDA

### Lampiran 3 Potongan Melintang Bendungan



		Provinsi : Jawa Tengah, Jawa Timur DIREKTORAT JENDERAL SUMBER DAYA AIR BAYAN KERJA OPERASI DAN PEMELIHARAAN BENDUNGAN SOLO & Sekeloaan No. 7, 10, 101 201 Gedung Bendaan Sekeloa 5110, 101, Telp. (0271) 211141	
POTONGAN MELINTANG DAN DETAIL TUBUH BENDUNGAN KRISAK		Lokasi Pekerjaan : Riry PZ.1B, PZ.1C dan PZ.1D	
No. Lembar :		No. Register :	
No. Revisi :		Nomor Kontrak :	
Diserahkan :		Nama Tim :	
Ditinjau :		& Puji Rahadi, DDL, IRL	
Diperiksa :		Dedy Triyanto, ST	
Mengetahui :		Sri Wahyu Kusumawati, ST, MS	
Kepala Operasi dan Pemeliharaan BDA		Rakh Hanan Sari, ST, MPRDA	
Tanggal :		Tanggal :	

# Lampiran 4 Bangunan Spillway

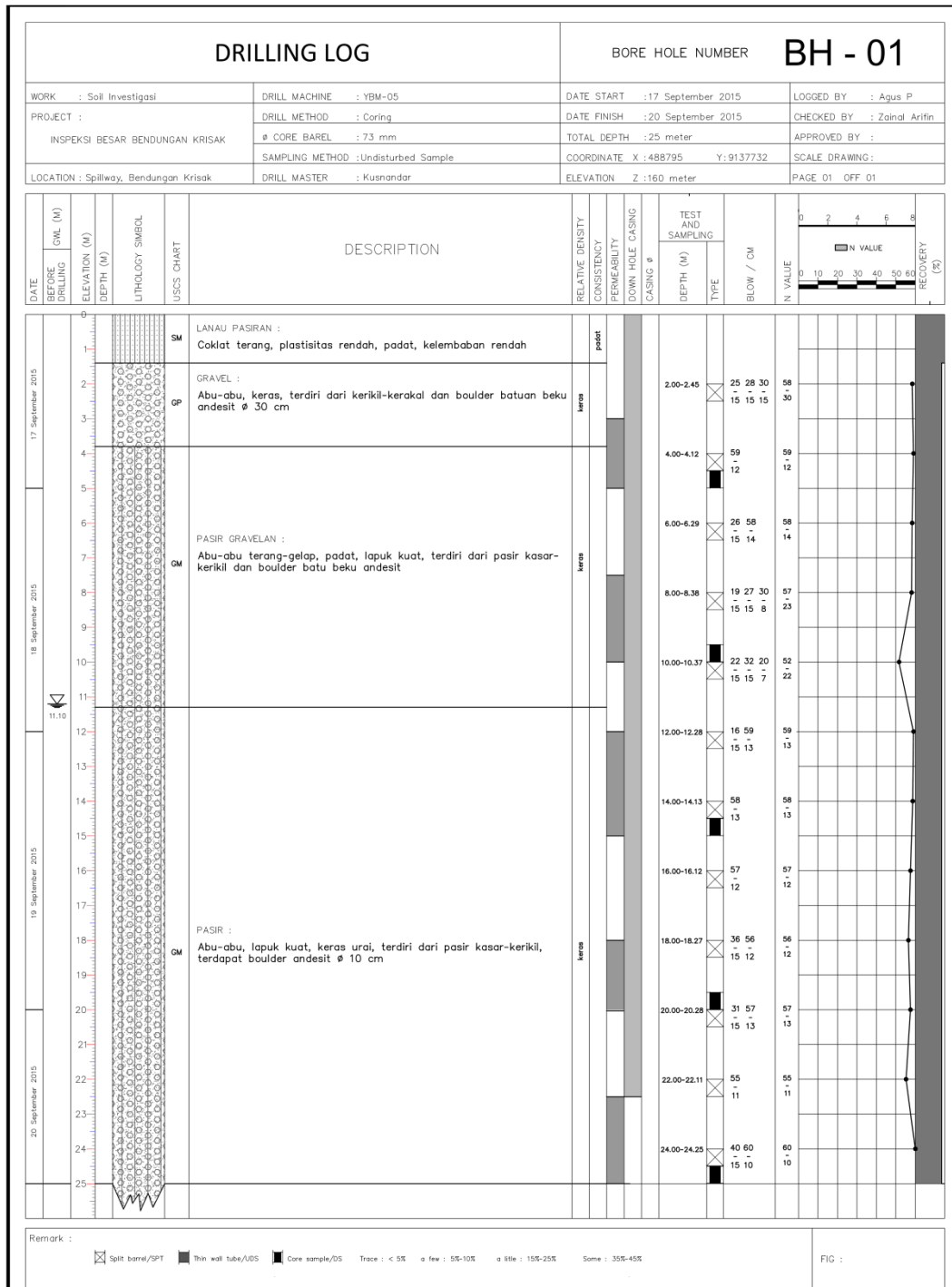


<b>KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT</b> <b>DIREKTORAT JENDERAL SUMBER DAYA AIR</b> <b>BALAI BESAR WILAYAH SUNGAI BENGAWAN SOLO</b> <b>SATUAN KERJA OPERASI DAN PEMELIHARAAN BENGAWAN SOLO</b> <small>Jl. Solo-Kaliurang Km. 7.70, BOX 267 Pabelan Kaliurang Sukoharjo 57162, Telp./Fax (0271)711643</small>		Provinsi : Jawa Tengah, Jawa Timur PENYIAPAN DAN PENERAPAN UIN OPERASI BENDUNGAN DAWUHAN, KRISAK DAN GONGGANG
<b>DENAH DAN POTONGAN BANGUNAN SPILLWAY</b> <b>BENDUNGAN KRISAK</b>		Lokasi Pekerjaan : Kab. Kudus, Magelang dan Wonorejo No. Lembar : No. Register : Nomor Kontrak :
Ketua Tim Direktur	Ir. Puji Hastowo, Dpl., HE Dedy Triantoro, ST.	HK.02.03/OPS/DA/DOISP-II/2019-3 Tanggal 9 Oktober 2019
Diperiksa Menyetujui	Direksi Pekerjaan PPK Operasi dan Pemeliharaan SDA I	Sri Wahyu Kusumastuti, ST., MSI Rath Nizam Sari, ST., MPSDA

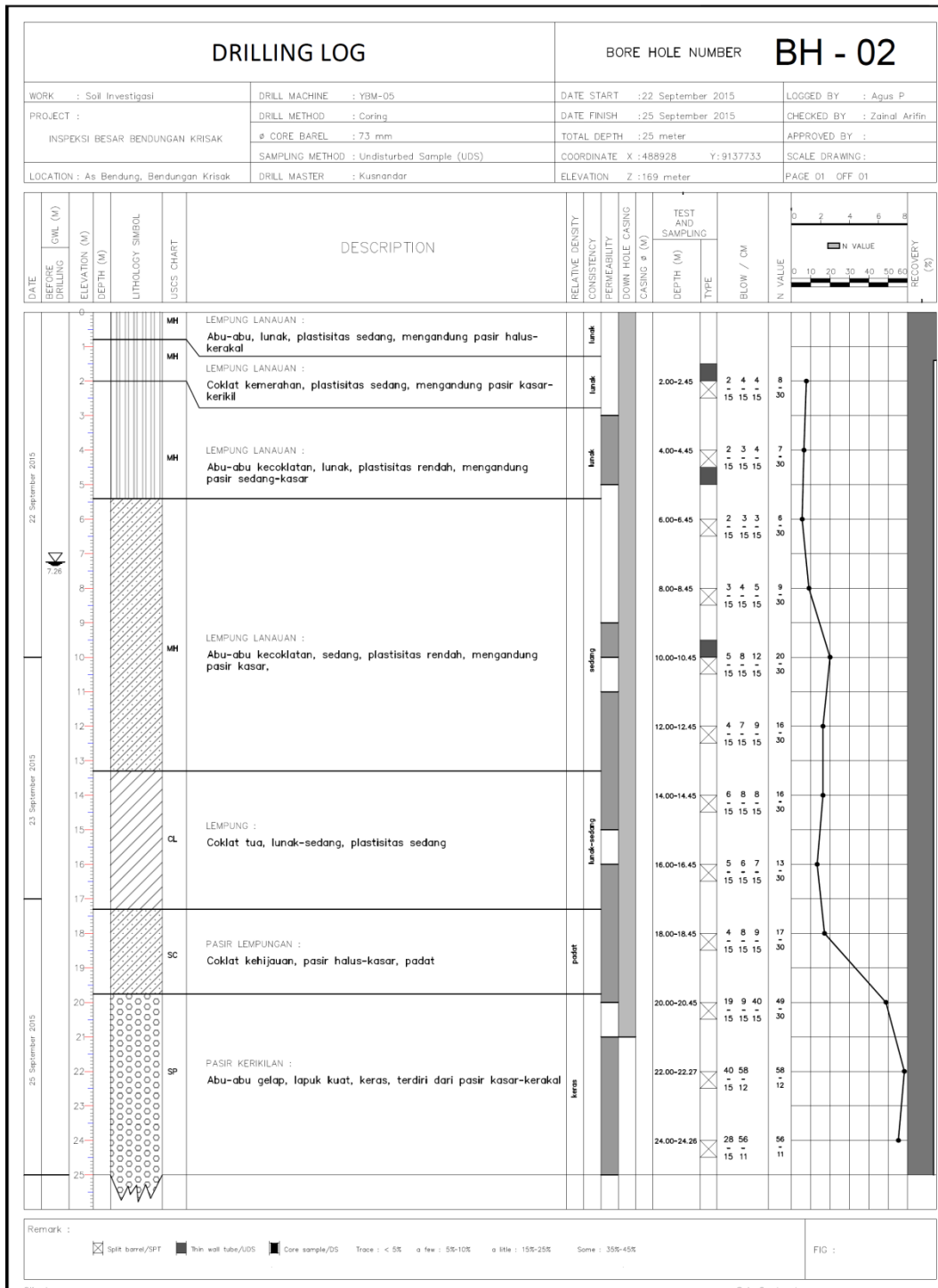
No. rev.	Tgl.	Yang Direvisi	Oleh	Direnc.	Disetujui



## Lampiran 5 Bor Log Tubuh Bendungan Krisak (BH-01)



### Lampiran 6 Bor Log Tubuh Bendungan Krisak (BH-02)



### Lampiran 7 Bor Log Tubuh Bendungan Krisak (BH-03)

