

**TUGAS AKHIR**

**ANALISIS STABILITAS DAN REMBESAN PADA  
TUBUH BENDUNG DENGAN VARIASI  
ELEVASI TINGGI MUKA AIR**

**(ANALYSIS OF STABILITY AND SEEPAGE OF  
THE DAM BODY WITH WATER LEVEL  
VARIATIONS)**

**(Studi Kasus : Bendungan Kedung Brubus di Desa  
Bulu, Kecamatan Pulang Kenceng, Kabupaten  
Madiun, Provinsi Jawa Timur)**

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



**FATAHILLAH NOOR MIFTAHUDIN  
15511176**

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

## TUGAS AKHIR

# ANALISIS STABILITAS DAN REMBESAN PADA TUBUH BENDUNG DENGAN VARIASI ELEVASI TINGGI MUKA AIR

*(ANALYSIS OF STABILITY AND SEEPAGE OF THE  
DAM BODY WITH WATER LEVEL VARIATIONS)*

**(Studi Kasus : Bendungan Kedung Brubus di Desa  
Bulu, Kecamatan Pulang Kenceng, Kabupaten  
Madiun, Provinsi Jawa Timur)**

Disusun oleh :

**Fatahillah Noor Miftahudin**

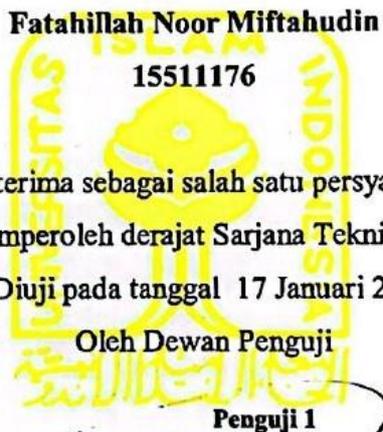
**15511176**

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

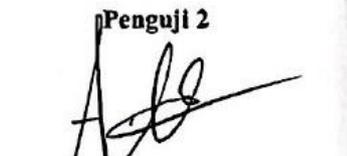
Diuji pada tanggal 17 Januari 2023

Oleh Dewan Penguji

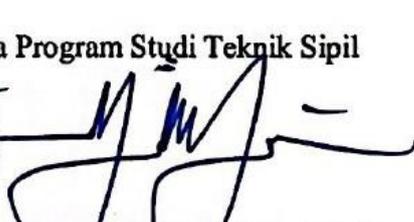
  
Pembimbing  
**M. Rifqi Abdurrozak, S.T., M.Eng.**  
NIK : 135111101

  
Penguji 1

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

  
Penguji 2  
**Ir. Akhmad Marzuko, M.T.**  
NIK : 885110107

Mengesahkan,

  
Ketua Program Studi Teknik Sipil  
  
**Yunalia Murtati, S.T., M.T., Ph. D.**  
NIK: 095110101

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan bahwa Tugas Akhir yang saya susun yang merupakan syarat untuk penyelesaian program sarjana di program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil dari saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan bersamaan dengan 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 merupakan hasil karya saya sendiri atau terdapat plagiasi pada bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 20 Januari 2023

Penulis,



Fatahillah Noor

15511176

## KATA PENGANTAR



*Assalamualaikum wr. wb.*

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT. yang telah melimpahkan rahmat, karunia dan hidayah-Nya kepada kita semua khususnya kepada saya, sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik. Salawat serta salam tak lupa selalu kami haturkan kepada junjungan Nabi besar kita Nabi Muhammad SAW yang telah membawa kita dari zaman jahiliyah menuju zaman yang terang benderang seperti apa yang kita rasakan saat ini.

Tugas Akhir saya yang berjudul **“ANALISIS STABILITAS DAN REMBESAN PADA TUBUH BENDUNG DENGAN VARIASI ELEVASI MUKA AIR”** disusun sebagai salah satu syarat agar saya bisa mendapatkan gelar Sarjana Teknik di jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Penulisan laporan Tugas Akhir ini dapat berjalan dengan lancar atas bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, melalui kesempatan ini penyusun ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak Muhammad Rifqi Abdurrozak S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing,
2. Ibu Hanindya Kusuma Artati, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji I,
3. Bapak Ir. Akhmad Marzuko, M.T. selaku Dosen Penguji II,
4. Ibu Yunalia Muntafi, ST., MT., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, dan
5. Orang tua yang selalu memberi semangat, doa dan dukungan tiada henti

Saya menyadari bahwa penyusunan laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kami mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak. Besar harapan saya semoga laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak dan kami selaku penyusun. Aminnn.

Yogyakarta, 20 Januari 2023

Penulis,



Fatahillah Noor

15511176



## DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Halaman Pengesahan	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR NOTASI	xiv
ABSTRAK	xvii
<i>ABSTRACT</i>	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Tinjauan Umum	5
2.2. Pengaruh Elevasi Muka Air Terhadap Rembesan	5
2.3. Pengaruh Elevasi Muka Air Terhadap Stabilitas Lereng	7
2.4. Keaslian Penelitian	13
BAB III LANDASAN TEORI	14
3.1. Bendungan	14
3.1.1. Umum	14
3.1.2. Bendungan Urugan	14
3.1.3. Klasifikasi Bendungan Urugan	15

3.2. Rembesan	18
3.2.1. Umum	18
3.2.2. Persamaan Darcy	19
3.2.3. Garis Freatik	19
3.2.4. Metode Cassagrande	20
3.2.4. Keamanan Rembesan Bendungan	21
3.3. Stabilitas	23
3.3.1 Pengertian Stabilitas	23
3.3.2 Kriteria Nilai Faktor Keamanan Stabilitas Lereng Bendungan	24
3.4. Gempa	26
3.4.1. Umum	26
3.4.2. Pengaruh Tingkat Risiko Bangunan	26
3.4.3. Koefisien Gempa	28
3.5. Parameter Tanah	33
3.5.1. Koefisien Permeabilitas	33
3.5.2. Kuat Geser Tanah	34
3.5.3. Kohesi	34
3.5.4. Sudut Geser Dalam	35
3.6. Software Geostudio	35
3.6.1. Umum	35
3.6.2. Program SLOPE/W	36
3.6.3. Program SEEP/W	36
<b>BAB IV METODE PENELITIAN</b>	<b>37</b>
4.1. Lokasi Penelitian	37
4.2. Bahan dan Alat	38
4.3. Data Penelitian	38
4.3.1. Data Teknis Bendungan	38
4.3.2. Data Geometri Bendungan	42
4.3.3. Data tanah	43
4.4. Parameter Material Bendungan	44
4.5. Metode Penelitian	45
4.6. Bagan Aliran	46
<b>BAB V PEMBAHASAN</b>	<b>49</b>

5.1. Analisis Tingkat Resiko Bendungan	49
5.2. Koefisien Gempa	50
5.3. Analisis Rembesan Tubuh Bendungan	50
5.3.1. Analisis Debit Rembesan	51
5.3.2. Analisis Kecepatan Rembesan	52
5.3.3. Analisis Gradien Hidraulik Rembesan	55
5.4. Analisis Stabilitas Lereng Tubuh Bendungan	56
5.4.1. Kondisi Muka Air Banjir	57
5.4.2. Kondisi Muka Air Normal	59
5.4.3. Kondisi Muka Air Minimum	61
5.4.4. Kondisi Surut Cepat	63
5.5. Pembahasan	65
5.5.1. Pembahasan Rembesan	65
5.5.2. Pembahasan Stabilitas Lereng	67
BAB VI PENUTUP	69
6.1. Kesimpulan	69
6.2. Saran	70
DAFTAR PUSTAKA	71

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang	9
Tabel 3. 1	Kriteria Faktor Keamanan Minimum untuk Stabilitas Bendungan Tipe Urugan	24
Tabel 3. 2	Kriteria Faktor Resiko Untuk Evaluasi Keamanan Bendungan	27
Tabel 3. 3	Kelas Risiko Bendungan dan Bangunan Air	27
Tabel 3. 4	Kriteria Beban Gempa Untuk Desain Bendungan	28
Tabel 3. 5	Faktor Amplikasi (FPGA)	33
Tabel 4. 1	Hasil Uji Material Timbunan Zona Inti pada Pelaksanaan Pekerjaan Timbunan	43
Tabel 4. 2	Hasil Uji Material Timbunan Zona Random pada Pelaksanaan Pekerjaan Timbunan	44
Tabel 4. 3	Parameter Material Bendungan Kedung Brubus	44
Tabel 5. 1	Tingkat Risiko Bendungan	49
Tabel 5. 2	Parameter Lapisan Tanah Untuk Analisis Rembesan	50
Tabel 5. 3	Parameter Lapisan Tanah Untuk Analisis Stabilitas Lereng	57
Tabel 5. 4	Pembahasan Keamanan Bendungan Terhadap Debit Rembesan	65
Tabel 5. 5	Pembahasan Keamanan Bendungan Terhadap Kecepatan Rembesan	66
Tabel 5. 6	Pembahasan Keamanan Bendungan Terhadap Gradien Hidraulik	66
Tabel 5. 7	Pembahasan Keamanan Stabilitas Tubuh Bendungan Kedung Brubus Tanpa Gempa	67
Tabel 5. 8	Pembahasan Keamanan Stabilitas Tubuh Bendungan Kedung Brubus Gempa OBE	67
Tabel 5. 9	Pembahasan Keamanan Stabilitas Tubuh Bendungan Kedung Brubus Gempa MDE	68

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1	Kondisi Bendungan Kedung Brubus	2
Gambar 3. 1	Potongan Melintang Bendungan Urugan Homogen	16
Gambar 3. 2	Potongan Melintang Bendungan Urugan Zonal	16
Gambar 3. 3	Potongan Melintang Bendungan Urugan Sekat	17
Gambar 3. 4	Klasifikasi Bendungan Urugan	18
Gambar 3. 5	Potongan Melintang Garis Freatik pada Bendungan Urugan	20
Gambar 3. 6	Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar (SB) Untuk Probabilitas Terlampaui 20% Dalam 10 Tahun	30
Gambar 3. 7	Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar (SB) Untuk Probabilitas Terlampaui 10% Dalam 10 Tahun	30
Gambar 3. 8	Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar (SB) Untuk Probabilitas Terlampaui 10% Dalam 50 Tahun	31
Gambar 3. 9	Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar (SB) Untuk Probabilitas Terlampaui 7% Dalam 75 Tahun	31
Gambar 3. 10	Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar (SB) Untuk Probabilitas Terlampaui 2% Dalam 50 Tahun	32
Gambar 3. 11	Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar (SB) Untuk Probabilitas Terlampaui 2% Dalam 100 Tahun	32
Gambar 4. 1	Situasi Waduk Kedung Brubus	37
Gambar 4. 2	Peta Situasi Tubuh Bendungan Kedung Brubus	42
Gambar 4. 3	Potongan Melintang Bendungan Kedung Brubus	46
Gambar 4. 4	Bagan Aliran Penelitian	47
Gambar 4. 5	Bagan Aliran Pemodelan Software	48
Gambar 5. 1	Output Perhitungan Debit Rembesan Keadaan MAB	51
Gambar 5. 2	Output Perhitungan Debit Rembesan Keadaan MAN	51

Gambar 5. 3	Output Perhitungan Debit Rembesan Keadaan MAM	52
Gambar 5. 4	Output Perhitungan Kecepatan Rembesan Keadaan MAB Pada SEEP/W	53
Gambar 5. 5	Output Perhitungan Kecepatan Rembesan Keadaan MAN Pada SEEP/W	53
Gambar 5. 6	Output Perhitungan Kecepatan Rembesan Keadaan MAM Pada SEEP/W	54
Gambar 5. 7	Output Perhitungan Gradien Hidraulik Keadaan MAB Pada SEEP/W	55
Gambar 5. 8	Output Perhitungan Gradien Hidraulik Keadaan MAN Pada SEEP/W	56
Gambar 5. 9	Output Perhitungan Gradien Hidraulik Keadaan MAM Pada SEEP/W	56
Gambar 5. 10	Hasil Geostudio Kondisi MAB Lereng Hulu Tanpa Gempa	57
Gambar 5. 11	Hasil Geostudio Kondisi MAB Lereng Hulu Gempa OBE	58
Gambar 5. 12	Hasil Geostudio Kondisi MAB Lereng Hulu Gempa MDE	58
Gambar 5. 13	Hasil Geostudio Kondisi MAB Lereng Hilir Tanpa Gempa	58
Gambar 5. 14	Hasil Running Kondisi MAB Lereng Hilir Gempa OBE	59
Gambar 5. 15	Hasil Running Kondisi MAB Lereng Hilir Gempa MDE	59
Gambar 5. 16	Hasil Running Kondisi MAN Lereng Hulu Tanpa Gempa	59
Gambar 5. 17	Hasil Running Kondisi MAN Lereng Hulu Gempa OBE	60
Gambar 5. 18	Hasil Running Kondisi MAN Lereng Hulu Gempa MDE	60
Gambar 5. 19	Hasil Running Kondisi MAN Lereng Hilir Tanpa Gempa	60
Gambar 5. 20	Hasil Running Kondisi MAN Lereng Hilir Gempa OBE	61
Gambar 5. 21	Hasil Running Kondisi MAN Lereng Hilir Gempa MDE	61
Gambar 5. 22	Hasil Running Kondisi MAM Lereng Hulu Tanpa Gempa	61
Gambar 5. 23	Hasil Running Kondisi MAM Lereng Hulu Gempa OBE	62
Gambar 5. 24	Hasil Running Kondisi MAM Lereng Hulu Gempa MDE	62
Gambar 5. 25	Hasil Running Kondisi MAM Lereng Hilir Tanpa Gempa	62
Gambar 5. 26	Hasil Running Kondisi MAM Lereng Hilir Gempa OBE	62
Gambar 5. 27	Hasil Running Kondisi MAM Lereng Hilir Gempa MDE	63
Gambar 5. 28	Hasil Running Kondisi Surut Cepat Lereng Hulu Tanpa Gempa	63
Gambar 5. 29	Hasil Running Kondisi Surut Cepat Lereng Hulu Gempa OBE	63
Gambar 5. 30	Hasil Running Kondisi Surut Cepat Lereng Hulu Gempa MDE	64

Gambar 5. 31 Hasil Running Kondisi Surut Cepat Lereng Hilir Tanpa Gempa	64
Gambar 5. 32 Hasil Running Kondisi Surut Cepat Lereng Hilir Gempa OBE	64
Gambar 5. 33 Hasil Running Kondisi Surut Cepat Lereng Hilir Gempa MDE	65



## DAFTAR LAMPIRAN

L-1. 1	Denah Penempatan Instrumentasi	73
L-1. 2	Kondisi Lereng Hulu	73
L-1. 3	Kondisi Lereng Hilir	74
L-1. 4	Kondisi Puncak Cofferdam Hilir	74
L-1. 5	Kondisi Mercu Pelimpah	75
L-1. 6	Kondisi Psiometer Standpipe Berdasarkan Posisi Perletakan	76
Lampiran 2. 1	Perbandingan Analisis Debit Banjir	77
Lampiran 2. 2	Perbandingan Hasil Penelusuran Banjir Kapasitas Pelimpah Berbagai Studi	78
Lampiran 3.1.	Potongan Memanjang Tubuh Bendung	80
Lampiran 3.2.	Potongan dan Detail Pemasangan OSP Baru	81

## DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

### Notasi:

Q	= volume aliran air persatuan waktu yang masuk ataupun keluar ( $m^3/s$ )
k	= koefisien permeabilitas (m/s)
V	= kecepatan rembesan ( $m^2/s$ )
i	= gradien hidrolik
A	= luas penampang tanah yang dilewati ( $m^2$ )
$\Delta h$	= perbedaan tinggi muka air pada kedua ujung contoh tanah (m)
L	= panjang lapisan tanah yang dirembesi (m)
q	= debit rembesan ( $m^3/s$ )
d	= jarak horizontal antara E dan C (m)
$\alpha$	= sudut hilir tanggul ( $^\circ$ )
a	= panjang zona basah (m)
H	= tinggi muka air (m)
$\gamma_w$	= berat volume air ( $t/m^3$ )
$i_e$	= gradien hidrolik debit
$i_c$	= gradien hidrolik dari material
$G_s$	= berat jenis tanah
e	= angka pori
$\tau$	= kuat geser tanah ( $kN/m^2$ )

$c$	= kohesi tanah ( $\text{kN/m}^2$ )
$\phi$	= sudut gesek dalam tanah ( $^\circ$ )
$\sigma$	= tegangan normal ( $\text{kN/m}^2$ )
$F_c$	= faktor aman pada komponen kohesi
$F_\phi$	= faktor aman pada komponen gesekan
$N_i$	= resultan gaya normal efektif
$U_i$	= tekanan air pori
$a_i$	= 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 ( $\text{kN/m}^2$ )
$\theta_i$	= sudut yang didefinisikan ( $^\circ$ )
$FR_t$	= faktor risiko tinggi bendungan
$FR_k$	= faktor risiko kapasitas tampung
$FR_e$	= faktor risiko kebutuhan evakuasi
$FR_h$	= faktor risiko tingkat kerusakan
$FPGA$	= faktor amplikasi untuk PGA
$PGAM$	= percepatan puncak di permukaan tanah
$SPGA$	= percepatan tanah di permukaan
$g$	= gravitasi ( $980 \text{ cm/s}^2$ )
$a_l$	= koreksi pengaruh daerah bebas (freefield) (bendungan tipe urugan: 0,7. untuk bendungan beton dan pasangan batu: 1)
$K$	= koefisien gempa terkoreksi untuk analisis stabilitas

**Singkatan:**

OBE	= <i>Operating Basis Earthquake</i>
MDE	= <i>Maximum Design Earthquake</i>
SF	= <i>Safety Factor</i>
SNI	= Standar Nasional Indonesia
SB	= Puncak Batuan Dasar
FR	= Faktor Risiko
PGA	= <i>Peak Ground Acceleration</i>
PSHA	= <i>Probabilistic Seismic Hazard Analysis</i>



## ABSTRAK

Bendungan sebagai bangunan penampung air haruslah didesain aman dalam segala aspek termasuk aman terhadap rembesan dan stabilitasnya. Bendungan Kedung Brubus dibangun pada tahun 2005-2007 oleh Balai Besar Wilayah Bengawan Solo. Bendungan Kedung Brubus berlokasi di Desa Bulu, Kecamatan Pilang Kenceng, Kabupaten Madiun, Provinsi Jawa Timur.

Dalam penelitian ini dilakukan analisis stabilitas lereng dan rembesan menggunakan perangkat lunak GeoStudio 2012. Pada aplikasi ini, SEEP/W digunakan untuk mengetahui besar rembesan pada tubuh bendung dan SLOPE/W untuk mengetahui nilai keamanan tubuh bendung. Analisis dilakukan dengan kondisi muka air banjir, muka air normal, muka air minimum, dan surut cepat dengan beban tanpa gempa dan dengan beban gempa OBE dan MDE.

Hasil dari analisis dengan menggunakan GeoStudio 2012 sesuai dengan SNI 8064 : 2016 didapatkan Bendungan Kedung Brubus aman terhadap debit rembesan namun tidak aman terhadap piping. Sedangkan untuk stabilitas Bendungan Kedung Brubus dalam kondisi tanpa beban gempa dan dengan beban gempa OBE dan MBE dalam keadaan aman.

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

## **ABSTARCT**

*Dams as water storage buildings must be designed to be safe in all aspects including safe against seepage and stability. The Kedung Brubus Dam was built in 2005-2007 by the Bengawan Solo Regional Office. Kedung Brubus Dam is located in Bulu Village, Pilang Kenceng District, Madiun Regency, East Java Province.*

*In this study, slope stability and seepage analysis was carried out using GeoStudio 2012 software. In this application, SEEP/W is used to determine the amount of seepage in the body of the weir and SLOPE/W to determine the safety value of the body of the weir. The analysis was carried out with flood water level conditions, normal water levels, minimum water levels, and fast receding with no earthquake loads and with OBE and MDE earthquake loads.*

*The results of the analysis using GeoStudio 2012 in accordance with SNI 8064: 2016 obtained that the Kedung Brubus Dam is safe against seepage discharge but not safe against piping. As for the stability of the Kedung Brubus Dam in conditions without earthquake load and with earthquake loads OBE and MBE are in safe condition..*

**Keywords :** *Dam, Seepage, Slope Stability, Geostudio 2012.*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Air adalah salah satu elemen terpenting untuk makhluk hidup khususnya manusia. Namun seiring berjalannya waktu semakin bertambahnya populasi manusia menyebabkan kebutuhan airpun ikut meningkat. Sedangkan ketersediaan air dipermukaan maupun didalam tanah selalu tetap. Untuk menghadapi berbagai musim di Indonesia terutama musim kemarau yang mengakibatkan persediaan air berkurang, untuk menjaga persediaan air mencukupi untuk kebutuhan setiap manusia berbagai usaha dilakukan seperti membangun sebuah bangunan untuk menahan air dalam jumlah yang besar. Bangunan yang dimaksud ialah sebuah bendungan.

Sesuai dengan Peraturan Pemerintah Nomor 37 Pasal 1 Tahun 2010 bahwa bendungan adalah bangunan air yang tersusun dari urugan tanah, urugan batu, beton dan juga pasangan batu yang disusun untuk menahan laju air atau lumpur, dan juga berfungsi untuk menangkap dan menyimpannya menjadi waduk.

Bendungan Kedung Brubus dibangun pada tahun 2005-2007 oleh Balai Besar Wilayah Bengawan Solo. Bendungan Kedung Brubus berlokasi di Desa Bulu, Kecamatan Pilang Kenceng, Kabupaten Madiun, Provinsi Jawa Timur. Kondisi bendungan dapat dilihat pada Gambar 1.1 berikut ini.



**Gambar 1. 1 Kondisi Bendungan Kedung Brubus**

(Sumber : Data Konsultan PT. Brahma Seta Indonesia Bersama PT. Raya Konstruk ,  
2020)

Bendungan ini membendung aliran sungai Kedungbrubus, memiliki luas tangkapan air seluas 31,7 km<sup>2</sup> untuk kebutuhan irigasi 500 hektare sawah dan irigasi suplesi maksimum 900 hektar. Selain bermanfaat untuk mendukung irigasi juga dijadikan warga sekitar tempat rekreasi. Bendungan memiliki banyak manfaat untuk memenuhi kebutuhan manusia, maka diperlukan analisa stabilitas tubuh bendungan terhadap berbagai kondisi agar bendungan yang direncanakan aman dan sesuai dengan usia guna yang telah direncanakan.

Pada penelitian ini saya berencana menggunakan perangkat lunak GeoStudio. Untuk menganalisis stabilitas tubuh bendungan dan mengetahui debit rembesan pada Tubuh Bendungan Kedung Brubus maka diperlukan program GeoStudio dengan fitur *SLOPE/W* dan *SEEP/W* agar mendapat hasil yang lebih akurat. Dengan program ini kita dapat menganalisis baik secara sederhana maupun kompleks dengan menggunakan salah satu dari delapan metode kesetimbangan batas untuk berbagai permukaan yang miring, kondisi tekanan air pori, sifat tanah dan beban terkonsentrasi.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut ini.

1. Bagaimana kondisi keamanan rembesan pada bagian tubuh bendungan jika dipengaruhi oleh muka air normal, muka air banjir, dan muka air minimum?
2. Bagaimana kondisi keamanan rembesan pada tubuh bendungan terhadap debit rembesan dan piping?
3. Bagaimana angka aman (SF) pada tubuh bendungan dengan kondisi muka air normal, muka air banjir, kondisi surut cepat?
4. Bagaimana angka aman (SF) pada tubuh bendungan yang dipengaruhi beban gempa pada kondisi muka air normal, muka air banjir, kondisi surut cepat?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui kondisi keamanan rembesan pada tubuh bendungan jika dipengaruhi oleh muka air normal, muka air banjir, dan muka air minimum.
2. Mengetahui kondisi keamanan tubuh Bendung Kedung Brubus terhadap rembesan dan piping.
3. Mengetahui angka aman (SF) pada tubuh bendungan dengan kondisi muka air normal, muka air banjir, kondisi surut cepat.
4. Mengetahui angka aman (SF) pada tubuh bendung akibat adanya beban gempa dengan kondisi muka air normal, muka air banjir, kondisi surut cepat.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah diantaranya sebagai berikut.

1. Menambah wawasan penulis dan pembaca mengenai evaluasi keamanan tubuh bendungan.
2. Menjadi referensi untuk mereka yang membutuhkan untuk penelitian, dsb.
3. Menjadi data acuan atau perbandingan guna untuk evaluasi selanjutnya.

### 1.5 Batasan Masalah

1. Bangunan Bendungan Kedung, Desa Bulu, Kecamatan Pilang Kenceng, Kabupaten Madiun, Provinsi Jawa Timur.
2. Analisis stabilitas bendungan dengan program *SLOPE/W*
3. Analisis rembesan dilakukan dengan program *SEEP/W*
4. Penelitian ini hanya sebatas menganalisis stabilitas dan rembesannya.
5. Garis freatik tidak berdasarkan piezometer di lapangan sesungguhnya.
6. Beban pada puncak bendungan diabaikan.
7. Potongan yang dipakai yaitu potongan Sta. 4.
8. Beban gempa yang digunakan adalah gempa static dengan menggunakan peta Gempa 2017.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

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

Kestabilan lereng suatu bendungan merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi dalam suatu bendungan, dimana jika syarat kestabilan lereng tersebut tidak terpenuhi, maka bisa mengakibatkan masalah keamanan bendungan yang meliputi retakan, rembesan, dan longsoran. Kestabilan lereng ini dipengaruhi oleh banyak faktor, antara lain material tubuh bendungan, kemiringan tubuh bendungan, gelombang air atau beban gempa dan lain-lain (Fredlund dan Rahardjo, 1993).

#### **2.2. Pengaruh Elevasi Muka Air Terhadap Rembesan**

Rahman, dkk (2014) dalam penelitiannya menyatakan dalam studi kasus tentang Pengaruh Fluktuasi Muka Air Waduk terhadap Bedit Rembesan bahwa pola rembesan dalam tubuh bendungan tergantung dari adanya tekanan air di sebelah hulu. Sesuai dengan persamaan Darcy, suatu aliran yang terjadi dalam tanah dipengaruhi oleh gradien hidrolik, yang mana dipengaruhi oleh beda tinggi atau elevasi muka air waduk. Studi kasus penelitian dilakukan pada Bendungan Benel yang berlokasi di Bali. Tujuan dalam penelitian ini adalah mengetahui pengaruh dari fluktuasi muka air waduk terhadap debit rembesan. Untuk mengetahui pola aliran yang terjadi di dalam tubuh bendungan dilakukan permodel perangkat lunak SEEP/W dari Geostudio dengan tipe analisis steady-state. Metode yang digunakan untuk mengetahui pengaruh fluktuasi muka air waduk terhadap debit rembesan dilakukan pendekatan dengan menghitung lama durasi rembesan yang terjadi. Hasil dari model menunjukkan pola aliran sesuai dengan prinsip metode Cassagrande. Hasil perhitungan menunjukkan pengaruh fluktuasi muka air waduk sangat kecil terhadap debit rembesan dengan durasi rembesan mencapai rata-rata 2,5 tahun. Akan tetapi, rembesan yang terjadi setelah pengisian awal

waduk hanya sekitar 5 bulan. Perbedaan durasi rembesan dari hasil perhitungan dan penelitian menunjukkan pemodelan belum sempurna.

Sukirman (2014) dalam penelitiannya yang menganalisis rembesan pada bending tipe urugan melalui uji Hidrolik di Laboratorium. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh ukuran partikel tanah, tinggi muka air terhadap kecepatan rembesan dan aliran rembesan pola pada bendungan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah hukum Darcy. Peralatan yang digunakan adalah Drainase dan Rembesan Tangki. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kecepatan rembesan pada pasir 1 (pasir sedang) dengan ketinggian air 40 cm, 30 cm, dan 25 cm adalah  $8,4 \times 10^{-4}$  cm / detik,  $7,4 \times 10^{-4}$  cm / detik dan  $6 \times 10^{-4}$  cm / detik. Pada 2 pasir (pasir halus) dengan ketinggian air 40 cm, 30cm dan 25 cm adalah  $3,58 \times 10^{-4}$  cm / detik,  $3,07 \times 10^{-4}$  cm / detik, dan  $2,69 \times 10^{-4}$  cm / detik. Hasilnya menunjukkan bahwa semakin tinggimuka air semakin cepat rembesan dan semakin besar ukuran butir tanah semakin cepat pula kecepatannya.

Mohammed, dkk (2019) dalam penelitiannya menyatakan air yang ditampung di reservoir bisa hilang melalui banyak cara. Air yang hilang melalui bendungan tanggul adalah rembesan. Rembesan tergantung pada banyak faktor termasuk sifat bahan konstruksi, geometri tubuh bendungan, ketinggian air waduk, sifat dasar bendungan & efisiensi konstruksi mitigasi rembesan seperti inti tanah liat dan dinding diafragma. Rembesan melalui bendungan Kiri dipelajari menggunakan metode elemen hingga dengan menggunakan perangkat lunak yang dikenal sebagai SEEP/W, 2007 yang dikembangkan oleh GeoSlope Studio. Empat bagian yang meliputi CH 685, CH 800, CH 1000 dan CH 1100 dipertimbangkan untuk analisis. Pada setiap bagian, 36 perbedaan elevasi reservoir yang mencakup elevasi reservoir bulanan tahun 1984, 1997 dan 2003 dipertimbangkan. Rembesan fluks, kecepatan hidrolik dan tekanan air pori diselidiki. Hasil penelitian mengungkapkan bahwa kecepatan hidrolik, rembesan dan tekanan air pori meningkat dengan meningkatnya elevasi reservoir. Dari analisis hasil rembesan tahunan yang dihitung untuk tahun 1984, 1997 dan 2003 adalah 17.152.165m<sup>3</sup>, 17.463.865m<sup>3</sup> dan 17.270.120m<sup>3</sup> masing-masing mewakili 2,779%, 2,840% dan 2,808% kehilangan air di 1984, 1997 dan 2003 dari reservoir yang dimaksudkan

untuk menyita 615 juta meter kubik. vektor kecepatan ditemukan banyak terkonsentrasi di lapisan atas pondasi yang memiliki konduktivitas hidrolis puncak dari  $1,00E-6$  m/s, juga ditemukan sebagian besar melewati inti tanah liat dan dinding diafragma karena memiliki konduktivitas hidrolis terkecil. Tekanan air pori negatif, nol dan positif di atas garis freatik, pada garis freatik dan di bawah garis freatik. Dalam setiap kasus, tekanan air pori mencapai puncaknya pada dasar pondasi, hulu dan setidaknya diujung kanan puncak bendungan. Pemipaan diamati tidak terjadi. Bendungan dikatakan aman untuk merembes kurang dari 3% dari tampungan reservoirnya

### **2.3. Pengaruh Elevasi Muka Air Terhadap Stabilitas Lereng**

Handayani, dkk (2014) dalam penelitiannya menyatakan kestabilan lereng berkaitan dengan kelongsoran. Kestabilan lereng dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu jenis muka air tanah, sudut kemiringan lereng, kuat geser tanah dan jenis tanah lapisan penyusunnya yang memiliki nilai kohesi dan sudut geser dalam yang berbeda. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh muka air tanah terhadap kestabilan lereng yang ditampilkan dalam nilai faktor keamanan. Dilakukan dengan menggunakan metode Fellenius, Bishop dan Janbu yang proses alasannya menggunakan GEOSLOP/W. Berdasarkan hasil analisis diperoleh nilai faktor keamanan pada lereng 1 dan 4 dengan  $FK = 2,523 - 3,705$  dan termasuk stabil, lereng 2 tergolong kritis dengan  $FK = 0,065 - 1,203$ , dan lereng 3 tergolong labil dengan  $FK = 0,625 - 0,710$ . Jarak muka air tanah terhadap bidang dasar kelongsoran juga dapat mempengaruhi kestabilan lereng, semakin jauh jarak muka air tanah terhadap bidang dasar kelongsoran dan semakin dekat jarak muka air tanah terhadap tanah permukaan lereng, maka semakin kecil nilai faktor keamanannya. Begitu pula sebaliknya.

Nanda dan Hamdhan (2016) melakukan penelitian tentang analisis rembesan dan stabilitas bendungan Bajulmati dengan metode elemen hingga menggunakan program PLAXIS AE dengan model 2D dan 3D untuk mengetahui nilai faktor keamanan dan jumlah debit rembesan serta pola runtuh/longsor pada tubuh bendungan. Analisis menggunakan variasi pembebanan yaitu saat selesai

konstruksi, muka air minimum, muka air maksimum dan surut cepat. Hasil analisis pada saat selesai konstruksi, muka air minimum, muka air maksimum, dan surut cepat pada model 2D sebelum diberi beban gempa berturut-turut diperoleh *safety factor* sebesar 2,088; 1,876; 1,965; 1,750, setelah diberi beban gempa diperoleh *safety factor* sebesar 1,823; 1,688; 1,461; 1,452. Arah bidang runtuh pada model 2D sebelum terjadi gempa berturut-turut bergerak ke arah hilir, hulu, hilir dan hulu. Sedangkan, untuk kondisi setelah terjadi gempa arah bidang runtuhnya bergerak ke arah hilir. Hasil faktor keamanan pada model 3D berturut-turut adalah sebesar 2,321 1,951; 2,103; 1,890 dan arah bidang longsor ke arah hulu, hulu, hilir dan hulu. Nilai faktor keamanan yang diperoleh dari model 2D dan 3D keseluruhannya memenuhi syarat keamanan berdasarkan RSNI-M-03-2002 dengan nilai syarat *SF* sebesar 1,1 s/d 1,5 (Badan Standarisasi Nasional, 2002).

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Penelitian	Rahman, dkk	Sukirman	Mohammed, dkk	Handayani, dkk	Nanda dan Hamdhan	Fatahillah Noor
Tahun	2014	2014	2019	2014	2016	2022
<b>Judul Penelitian</b>	Pengaruh Fluktuasi Muka Air Waduk Terhadap Debit Rembesan Menggunakan Model SEEP/W (Studi Kasus di Bendungan Benel, Kabupaten Jembrana, Bali)	Analisis Rembesan Pada Bendung Tipe Urugan Melalui Uji Hidrolik Di Laboratorium Hidro Ft Unsri	<i>Seepage Analysis of Kiri Dam Using Finite Elements Method</i>	Pengaruh Muka Air Tanah Terhadap Kestabilan Lereng menggunakan Geoslope/W	Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Bajulmati dengan Metode Elemen Hingga Model 2D dan 3D	Analisis Stabilitas Dan Rembesan Lereng Pada Tubuh Bendung Dengan Variasi Elevasi Tinggi Muka Air
<b>Tujuan Penelitian</b>	Mengetahui pengaruh dari fluktuasi muka air waduk terhadap debit rembesan.	Menganalisis hubungan antara ukuran butiran tanah dengan kecepatan rembesan pada bendung, menganalisis hubungan tinggi muka air di hulu bendung dengan kecepatan rembesan, menganalisis pengaruh filter terhadap rembesan	Menganalisis pengaruh ketinggian muka air pada reservoir bendung terhadap rembesan yang terjadi pada tubuh bendungan	Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh muka air tanah terhadap kestabilan lereng yang ditampilkan dalam nilai factor keamanan.	Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai factor keamanan dan jumlah debit rembesan serta pola runtuh/longsor pada tubuh bendungan	Mengetahui debit rembesan dan nilai factor keamanan pada tubuh bendungan (saat kondisi muka air normal, muka air banjir, kondisi surut cepat dengan perbandingan faktor dipengaruhi beban gempa dan tanpa beban gempa)

Penelitian	Rahman, dkk	Sukirman	Mohammed, dkk	Handayani, dkk	Nanda dan Hamdhan	Fatahillah Noor
Tahun	2014	2014	2019	2014	2016	2022
<b>Metode</b>	Metode yang digunakan untuk mengetahui pengaruh fluktuasi muka air waduk terhadap debit rembesan dilakukan pendekatan dengan menghitung lama durasi rembesan yang terjadi. Hasil dari model menunjukkan pola aliran sesuai dengan prinsip metode Cassagrande.	Analisis dilakukan dengan membuat model dengan mempersiapkan tanah, uji Analisa saringan, uji konduktivitas hidrolik, pembuatan model serta <i>running</i> pemodelan di laboratorium dan menggunakan prinsip hukum Darcy	. Rembesan melalui bendungan Kiri dipelajari menggunakan metode elemen hingga dengan menggunakan perangkat lunak yang dikenal sebagai SEEP/W, 2007 yang dikembangkan oleh GeoSlope Studio	Dilakukan dengan menggunakan metode Fellenius, Bishop dan Janbu yang proses alasisnya menggunakan GEOSLOP/W.	Penelitian tentang analisis rembesan dan stabilitas bendungan Bajulmati dengan metode elemen hingga menggunakan program PLAXIS AE dengan model 2D dan 3D, analisis menggunakan variasi pembebanan yaitu saat selesai konstruksi, muka air minimum, muka air maksimum dan surut cepat. Hasil analisis pada saat selesai konstruksi, muka air minimum, muka air maksimum, dan surut cepat pada model 2D dan 3D pada kondisi sebelum dan sesudah diberi beban Gempa	Metode yang digunakan untuk mencari nilai debit rembesan menggunakan metode cassagrande dibantu dengan fitur SEEP/W pada program Geostudio dan analisis stabilitas lereng menggunakan metode bishop dibantu dengan fitur SLOPE/W pada program Geostudio untuk mengetahui angka keamanan lereng pada tubuh bendungan.

Penelitian	Rahman, dkk	Sukirman	Mohammed, dkk	Handayani, dkk	Nanda dan Hamdhan	Fatahillah Noor
Tahun	2014	2014	2019	2014	2016	2022
<b>Hasil Penelitian</b>	<p>Hasil perhitungan menunjukkan pengaruh fluktuasi muka air waduk sangat kecil terhadap debit rembesan dengan durasi rembesan mencapai rata-rata 2,5 tahun. Akan tetapi, rembesan yang terjadi setelah pengisian awal waduk hanya sekitar 5 bulan. Perbedaan durasi rembesan dari hasil perhitungan dan penelitian menunjukkan pemodelan belum sempurna.</p>	<p>Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kecepatan rembesan pada pasir 1 (pasir sedang) dengan ketinggian air 40 cm, 30 cm, dan 25 cm adalah <math>8,4 \times 10^{-4}</math> cm / detik, <math>7,4 \times 10^{-4}</math> cm / detik dan <math>6 \times 10^{-4}</math> cm / detik. Pada 2 pasir (pasir halus) dengan ketinggian air 40 cm, 30cm dan 25 cm adalah <math>3,58 \times 10^{-4}</math> cm / detik, <math>3,07 \times 10^{-4}</math> cm / detik, dan <math>2,69 \times 10^{-4}</math> cm / detik. Hasilnya menunjukkan bahwa semakin tinggi muka air semakin cepat rembesan dan semakin besar ukuran butir tanah semakin cepat pula kecepatannya.</p>	<p>Hasil penelitian mengungkapkan bahwa kecepatan hidrolik, rembesan dan tekanan air pori meningkat dengan meningkatnya elevasi reservoir. Dari analisis hasil rembesan tahunan yang dihitung untuk tahun 1984, 1997 dan 2003 adalah 17.152.165m<sup>3</sup>, 17.463.865m<sup>3</sup> dan 17.270.120m<sup>3</sup> masing-masing mewakili 2,779%, 2,840% dan 2,808% kehilangan air di 1984, 1997 dan 2003 dari reservoir, vektor kecepatan ditemukan banyak terkonsentrasi di lapisan atas pondasi yang memiliki konduktivitas hidrolik puncak dari <math>1,00E-6</math> m/s, juga ditemukan sebagian besar melewati inti tanah liat dan dinding diafragma karena memiliki</p>	<p>Berdasarkan hasil analisis diperoleh nilai factor keamanan pada lereng 1 dan 4 dengan <math>FK = 2,523 - 3,705</math> dan termasuk stabil, lereng 2 tergolong kritis dengan <math>FK = 0,065 - 1,203</math>, dan lereng 3 tergolong labil dengan <math>FK = 0,625 - 0,710</math>. Jarak muka air tanah terhadap bidang dasar kelongsoran juga dapat mempengaruhi kestabilan lereng, semakin jauh jarak muka air tanah terhadap bidang dasar kelongsoran dan semakin dekat jarak muka air tanah terhadap tanah permukaan lereng, maka semakin kecil nilai factor keamanannya. Begitu pula sebaliknya.</p>	<p>variasi pembebanan yaitu saat selesai konstruksi, muka air minimum, muka air maksimum dan surut cepat. Hasil analisis pada saat selesai konstruksi, muka air minimum, muka air maksimum, dan surut cepat pada model 2D sebelum diberi beban gempa berturut-turut diperoleh <i>safety factor</i> sebesar 2,088; 1,876; 1,965; 1,750, setelah diberi beban gempa diperoleh <i>safety factor</i> sebesar 1,823; 1,688; 1,461; 1,452. Arah bidang runtuh pada model 2D sebelum terjadi gempa berturut-turut bergerak ke arah hilir, hulu, hilir dan hulu. Sedangkan, untuk kondisi setelah terjadi gempa arah bidang runtuh keseluruhannya bergerak ke arah hilir.</p>	

Penelitian	Rahman, dkk	Sukirman	Mohammed, dkk	Handayani, dkk	Nanda dan Hamdhan	Fatahillah Noor
Tahun	2014	2014	2019	2014	2016	2022
			<p>konduktivitas hidrolis terkecil. Tekanan air pori negatif, nol dan positif di atas garis freatik, pada garis freatik dan di bawah garis freatik. Tekanan air pori mencapai puncaknya pada dasar pondasi, hulu dan diujung kanan puncak bendungan. Bendungan dikatakan aman untuk merembes kurang dari 3% dari tampungan reservoirnya</p>		<p>Hasil faktor keamanan pada model 3D berurut-turut adalah sebesar 2,321 1,951; 2,103; 1,890 dan arah bidang longsor ke arah hulu, hulu, hilir dan hulu. Nilai faktor keamanan yang diperoleh dari model 2D dan 3D keseluruhannya memenuhi syarat keamanan berdasarkan RSNI-M-03-2002 dengan nilai syarat <math>SF</math> sebesar 1,1 s/d 1,5 (Badan Standarisasi Nasional, 2002).</p>	

#### **2.4. Keaslian Penelitian**

Berdasarkan dari penyajian penelitian-penelitian yang sudah pernah dilakukan sebelumnya seperti pada Tabel 2.1, dapat disimpulkan bahwa penelitian ini sudah pernah dilakukan di lokasi yang berbeda-beda. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai debit rembesan dengan menggunakan fitur SEEP/W dan mengetahui stabilitas lereng bendungan dengan fitur SLOPE/W pada program Geostudio sehingga dapat bermanfaat untuk para perencana agar lebih mempertimbangkan faktor keamanan pada tubuh bendungan agar penggunaan dan manfaat bendungan sesuai dengan yang direncanakan.



## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1. Bendungan**

##### **3.1.1. Umum**

Secara umum bendungan adalah bangunan berupa urugan tanah, urugan batu, beton dan/atau pasangan batu yang dibangun untuk menahan dan menampung air, dapat pula dibangun untuk menahan dan menampung limbah tambang (*tailing*) atau menampung lumpur sehingga membentuk waduk (Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2010).

Bendungan bermanfaat sebagai penangkap dan menyimpan air pada saat musim penghujan saat air sungai mengalir dalam jumlah besar dan yang melebihi kebutuhan dan keperluan. Bendungan juga digunakan untuk keperluan irigasi, penampungan limbah, cadangan air minum, pengendali banjir, perikanan, pariwisata dan olahraga air.

##### **3.1.2. Bendungan Urugan**

Bendungan urugan adalah bendungan yang terbuat dari bahan urugan dari *borowarea* (*borrow area*) yang dipadatkan dengan menggunakan *vibrator roller* atau alat pemadat lainnya yang sesuai pada seetiap hamparan dengan tebal tertentu (Departemen Pekerjaan Umum Nomor 27 Tahun 2008 Tentang Analisis Dinamik Bendungan Urugan).

Bendungan urugan, umumnya diklasifikasikan menjadi beberapa jenis berdasar pada material yang digunakan, yaitu:

1. bendungan urugan tanah (*earth fill dam*), dan
2. bendungan urugan batu (*rock fill dam*).

Bendungan urugan memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan dari bendungan urugan yaitu, pembangunannya dapat dilaksanakan hampir di semua kondisi geologi dan bahan untuk tubuh bendungan dapat menggunakan batuan yang ada disekitar lokasi pembangunan bendungan. Sedangkan kelemahan dari

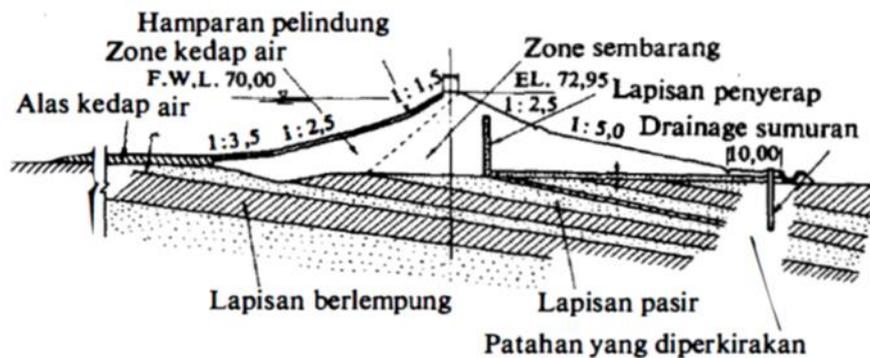
bendungan urugan, yaitu tidak mampu menahan limpasan melebihi mercunya dan limpasan yang terjadi dapat menyebabkan kelongsoran pada lereng hilir yang dapat mengakibatkan jebolnya bendungan tersebut.

### 3.1.3. Klasifikasi Bendungan Urugan

Berdasarkan fungsinya sebagai penampung air atau pengangkat permukaan air di dalam suatu waduk, secara garis besarnya tubuh bendungan menahan rembesan air ke arah hilir serta penyangga tampungan air tersebut. Ditinjau dari penempatan dan susunan bahan yang membentuk tubuh bendungan untuk dapat memenuhi fungsinya, maka bendungan urugan dapat digolongkan dalam 3 (tiga) tipe utama, yaitu sebagai berikut ini.

1. Bendungan urugan homogen (bendungan homogen)

Bedungan urugan homogen adalah bendungan urugan yang tubuh bendungannya terdiri dari tumpukan tanah yang jenisnya hampir sama dengan klasifikasi hampir homogen (dari *borrow area*) dan dipadatkan secara mekanik dengan menggunakan *vibrator roller* atau alat lainnya yang sesuai pada setiap hamparan dengan tebal tertentu. Bendungan homogen merupakan bendungan paling sederhana dibandingkan dengan tipe lainnya, namun sering tedapat permasalahan yang menyangkut dengan tubuh bendungan. Hal ini disebabkan karena diseluruh tubuh bendungan terletak di bawah garis rembesan (*seepage line*), senantiasa dalam kondisi jenuh , sehingga kekuatan geser, daya dukung dan susut luncur alamiahnya menurun pada tingkat yang rendah (Gambar 3.1).

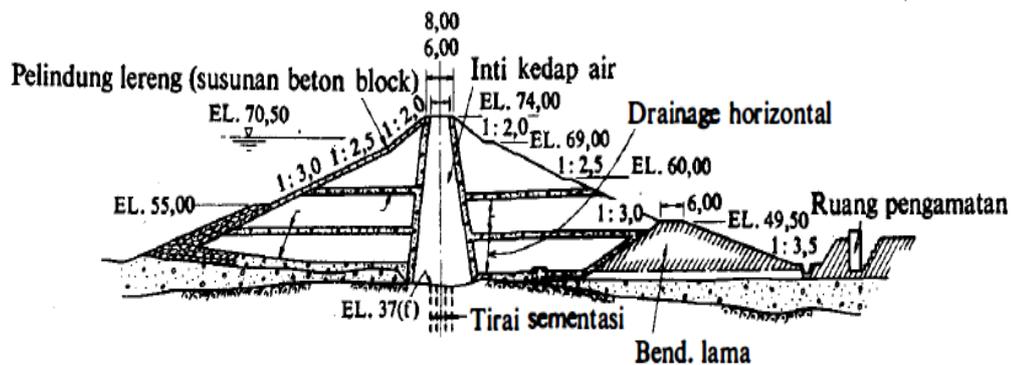


**Gambar 3. 1 Potongan Melintang Bendungan Urugan Homogen**

(Sumber : Sosrodarsono dan Takeda, 1977)

2. Bendungan urugan zonal (bendungan zonal)

Bendungan urugan digolongkan dalam tipe zonal, apabila timbunan yang membentuk tubuh bendungan terdiri dari batuan dengan gradasi (susunan ukuran butiran) yang berbeda-beda dalam urutan-urutan pelapisan tertentu. Potongan melintang bendungan urugan zonal dapat dilihat pada Gambar 3.2 sebagai berikut.

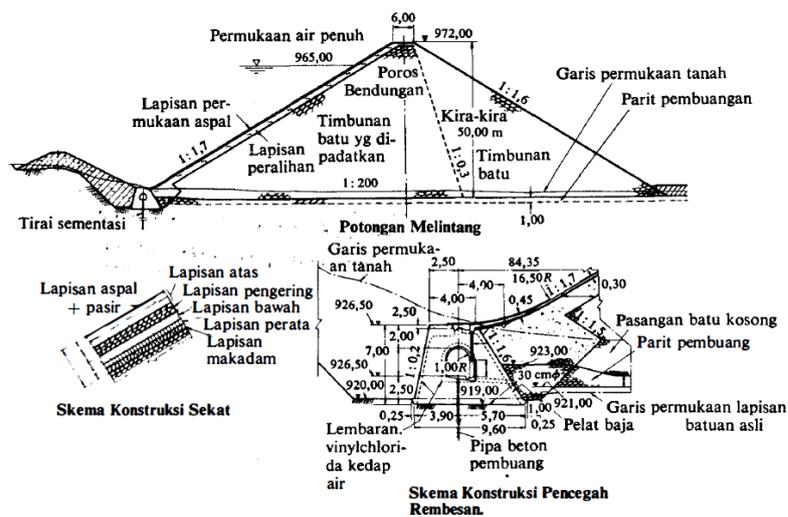


**Gambar 3. 2 Potongan Melintang Bendungan Urugan Zonal**

(Sumber: Sosrodarsono dan Takeda, 1977)

### 3. Bendungan Urugan ersekat (bendungan sekat)

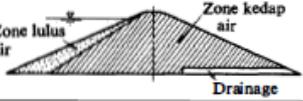
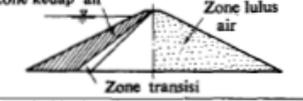
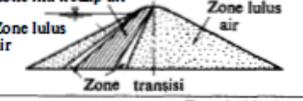
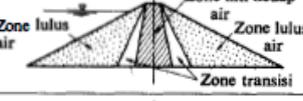
Bendungan urugan yang pada lereng hulu tubuh bendungannya dilapisi dengan sekat tidak lolos air (dengan kekedapan yang tinggi) seperti lembaran baja tahan karat, beton bertulang, beton aspal, hamparan plastik, dan lain-lain. Potongan melintang bendungan sekat dapat dilihat pada Gambar 3.3 sebagai berikut.



**Gambar 3. 3 Potongan Melintang Bendungan Urugan Sekat**

(Sumber: Sosrodarsono dan Takeda, 1977)

Secara garis besar perbedaan antara bendungan urugan homogen, bendungan zonal, dan bendungan sekat dapat dilihat pada Gambar 3.4 sebagai berikut.

Type:	Skema Umum	Keterangan
Bendungan Homogen		Apabila 80% dari seluruh bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang bergradasi hampir sama.
Bendungan Zonal	Bendungan Tirai 	Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan tirai kedap air di udiknya.
	Bendungan Inti miring 	Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan miring ke hilir.
	Bendungan Inti vertikal 	Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan vertikal.
Bendungan Sekat		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan dinding tidak lulus air di lereng udiknya, yang biasanya terbuat dari lembaran baja tahan karat, lembaran beton bertulang, aspal beton, lembaran plastik, dll nya.

**Gambar 3. 4 Klasifikasi Bendungan Urugan**

(Sumber: Sosrodarsono dan Takeda, 1977)

## 3.2. Rembesan

### 3.2.1. Umum

Rembesan merupakan aliran secara terus menerus mengalir dari hulu menuju hilir. Rembesan pada bendungan dan pondasi merupakan faktor penting dalam stabilitas bendungan. Aliran air ini merupakan aliran dari air waduk melalui material yang lolos air (*permeable*), baik melalui tubuh bendungan maupun pondasi. Maka dari itu pola aliran dan debit dari rembesan yang keluar melalui tubuh bendungan dan pondasi sangat penting untuk diperhatikan.

Semakin cepat muka air turun ke bawah maka factor keamanan 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.

### 3.2.2. Persamaan Darcy

Henri Darcy berpendapat bahwa besarnya kecepatan aliran yang mengalir masuk ataupun keluar dari lapisan tanah sebanding dengan gradien hidrauliknya. Hukum Darcy dalam Hardiyatmo (2018) dapat digunakan untuk menghitung debit rembesan yang melalui struktur tubuh bendungan. Dalam merencanakan sebuah bendungan, hal yang perlu diperhatikan salah satunya adalah stabilitasnya terhadap bahaya longsor, erosi lereng dan kehilangan air akibat dari rembesan yang terjadi dalam tubuh bendungan. Beberapa cara diberikan untuk menentukan besarnya rembesan yang melewati bendungan yang dibangun dan tanah homogen. Berikut ini beberapa cara untuk menentukan debit rembesan dinyatakan dalam Persamaan 3.1, 3.2, dan 3.3 sebagai berikut.

$$Q = V \cdot A \quad (3.1)$$

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

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

dengan :

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

k = koefisien permeabilitas (m/s)

V = kecepatan rembesan (m/s)

i = gradien hidrolik

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

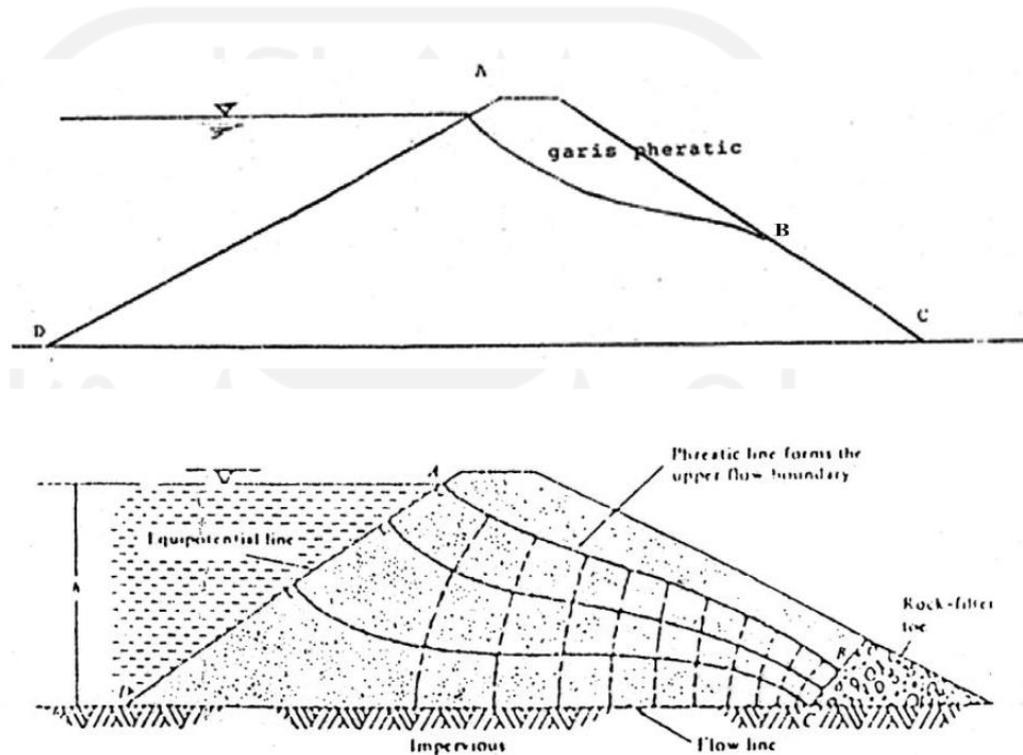
$\Delta h$  = perbedaan tinggi muka air pada kedua ujung contoh tanah (m)

L = panjang lapisan tanah yang dirembesi (m)

### 3.2.3. Garis Freatik

Garis freatik adalah garis aliran air yang berhubungan dengan bidang imajiner dalam tubuh dan pondasi bendungan yang tekanan air dan porinya sama dengan

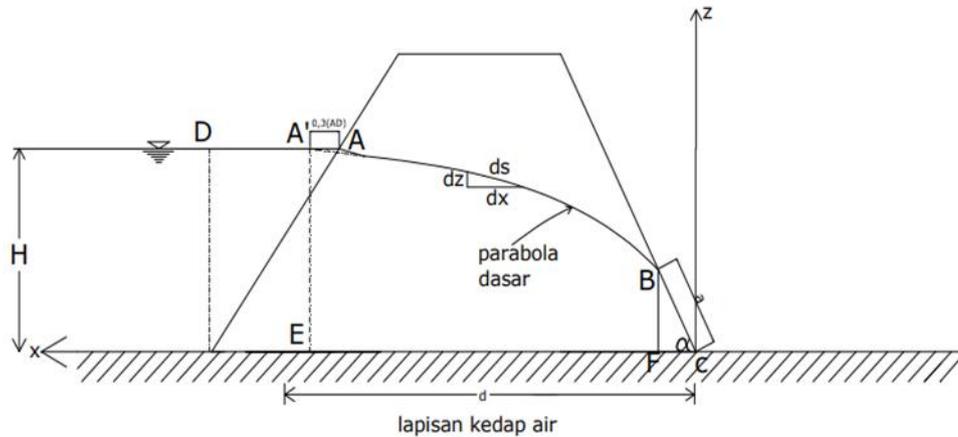
tekanan atmosfer. Jaringan aliran untuk bendungan tanah yang pondasinya tanah kedap air dapat digambarkan mengikuti prosedur yang telah dibicarakan terdahulu, namun harus memperhatikan beberapa hal. Contoh jaringan aliran pada bendungan yang homogen dan potongan melintang garis freatik pada bendungan urugan dapat dilihat pada gambar 3.5 sebagai berikut.



**Gambar 3. 5 Potongan Melintang Garis Freatik pada Bendungan Urugan**  
(Sumber : Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi 2017)

### 3.2.4. Metode Cassagrande

A. Cassagrande (1937) memberikan cara untuk menghitung rembesan yang melewati tubuh bendungan yang menggunakan permodelan. Permodelan Cassagrande dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



**Gambar 3. 6 Perhitungan Rembesan Metode Cassagrande**

(Sumber : Hardiyatmo, 2006)

Besarnya debit rembesan dapat ditentukan dengan persamaan dibawah ini.

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

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

dengan :

- q = debit rembesan (m<sup>3</sup>/s)
- k = koefisien permeabilitas (m/s)
- $\alpha$  = sudut hilir tanggul (°)
- d = jarak horizontal antara E dan C (m)
- a = panjang zona basah (m)
- H = tinggi muka air (m)

### 3.2.5. Keamanan Rembesan Bendungan

Berdasarkan dari Pedoman Grouting Untuk Bendungan Departemen Pekerjaan Umum-SDA yang mengacu pada batasan yang berlaku di Jepang (Japanese Institute of Irrigation and Drainage 1988) nilai angka rembesan yang diperbolehkan pada bendungan yaitu sebanyak total rembesan pada waduk yang

melewati pondasi dan badan bendungan tidak boleh lebih dari 1% rata-rata debit sungai yang masuk ke dalam waduk.

Pemeriksaan piping atau boiling harus dibandingkan kecepatan rembesan ( $V_s$ ) dengan kecepatan kritis ( $V_c$ ). Kecepatan rembesan tidak boleh lebih besar dari kecepatan kritis yang terjadi ( $V_s > V_c$ ). Jika kecepatan rembesan ( $V_s$ ) lebih besar dari kecepatan kritis ( $V_c$ ) maka akan terjadinya pengangkatan partikel sehingga menyebabkan terjadinya piping. Berikut ini persamaan untuk mencari nilai kecepatan yang diijinkan yang dapat dilihat pada persamaan sebagai berikut.

$$V_c = \sqrt{\frac{W \cdot g}{F \cdot \gamma \omega}} \quad (3.6)$$

$$W = (GS-1) \times \frac{1}{6} \times p \times d^3 \quad (3.7)$$

$$F = \frac{1}{4} \times p \times d^2 \quad (3.8)$$

dengan ;

$V_c$  = Kecepatan kritis yang diizinkan (m/s)

$W$  = Berat butiran bahan (kg)

$g$  = Percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

$F$  = Luas permukaan yang menampung filtrasi ( $m^2$ )

$\gamma \omega$  = Berat isi air ( $kg/m^3$ )

$d$  = Ukuran butiran terkecil (cm)

Berdasarkan Harza (1935) dalam Hardiyatmo (2017) menyatakan bahwa nilai faktor keamanan bangunan air berupa perbandingan antara nilai gradien hidrolis kritis dengan gradien keluar maksimum harus lebih besar dari 3 sampai dengan 4. Syarat keamanan Bendungan berdasarkan gradien hidrolis dirumuskan pada Persamaan 3.9, 3.10, 3.11 sebagai berikut.

$$\text{Syarat Keamanan : } \frac{i_c}{i_e} > 3 \text{ s/d } 4 \quad (3.9)$$

$$\text{Gradien Hidrolik Kritis} = i_c = \frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (3.10)$$

$$\text{Gradien Keluar Maksimum} = i_e = \frac{h}{L} \quad (3.11)$$

Dengan :

$\gamma'$  = Berat Volume Terapung

$\gamma_w$  = Berat Volume air

$i_c$  = Gradien hidrolik dari material

$i_e$  = Gradien hidrolik debit

$G_s$  = Berat jenis tanah

$e$  = Angka pori

### 3.3. Stabilitas

#### 3.3.1 Pengertian Stabilitas

Stabilitas bendung merupakan perhitungan kontruksi untuk menentukan ukuran bendung agar dapat menahan muatan dan gaya yang terjadi padanya dalam segala keadaan, dalam hal ini termasuk gempa bumi hebat, banjir besar dan angin kencang. Syarat dari stabilitas kontruksi seperti harus aman terhadap geseran, harus aman terhadap rembesan, lereng di sebelah hulu dan hilir bendung tidak mudah longsor, dan harus aman terhadap penurunan bendung.

Selain itu perlu dilakukan penyelidikan geologi teknik untuk mengetahui kekuatan pondasi yang akan dirancang, apakah rembesan airnya aman dan tidak membahayakan konstruksi, dan apakah bendung dapat dioperasikan untuk penggunaan airnya dalam jangka waktu yang lama minimal 30 tahun (Mawardi & Memet, 2010).

Syarat dari stabilitas bendung antara lain:

1. untuk konstruksi batu kali dengan selimut beton, tidak boleh terjadi tegangan tarik,

2. momen tahan harus lebih besar dari pada momen guling,
3. konstruksi tidak boleh mengalami pergeseran,
4. tegangan tanah yang terjadi harus lebih kecil dari tegangan tanah yang diijinkan, dan
5. setiap titik pada seluruh konstruksi tidak boleh terangkat oleh gaya ke atas (*balance*) antara tekanan ke atas dan tekanan ke bawah.

### 3.3.2 Kriteria Nilai Faktor Keamanan Stabilitas Lereng Bendungan

Gambaran kondisi kewanaman lereng bendungan yang dihasilkan dari analisis stabilitas lereng bendungan ditunjukkan dengan nilai Faktor Keamanan (FK). SNI 8064:2016 (Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Tipe Urugan) yang membahas tentang analisis stabilitas lereng statik bendungan tipe urugan dengan kriteria nilai faktor keamanan untuk berbagai kondisi bendungan, yang terdapat pada tabel 3.6.

**Tabel 3. 1 Kriteria Faktor Keamanan Minimum untuk Stabilitas Bendungan Tipe Urugan**

NO	Kondisi	Kuat Geser	Tekanan Air pori	FK Tanpa Gempa	FK dengan Gempa *
1	Selesai Kontruksi tergantung : 1.Jadwal kontruksi 2. Hubungan antara tekanan air pori dan waktu  Lereng U/S dan D/S  Dengan gempa tanpa kerusakan digunakan 50% koefisien gempa desain	1.Efektif	Peningkatan tekanan air pori pada urugan dan fondasi dihitung menggunakan data lab. Dan pengawasan instrument.	1.3	1.2
			Idem hanya tanpa pengawasan instrument	1.4	1.2
			Hanya pada urugan tanpa dan dengan/tanpa pengawasan instrumen	1.3	1.2

NO	Kondisi	Kuat Geser	Tekanan Air pori	FK Tanpa Gempa	FK dengan Gempa *
		2.Total	Tanpa Pengawasan	1.3	1.2
2	Aliran Langgeng tergantung : 1.Evaluasi muka air normal sebelah udik. 2.Elevasi muka air sebelah hilir. Lereng/U/S dan D/S dengan gempa tapa kerusakan digunakan 100% 100f koef gempa desain.	1.Efektif	Dari analisis rembesan	1.5	1.2
3	Pengoperasi waduk tergantung : 1.Elevasi muka air maksimum di udik. 2.Elevasi muka air minimum di udik ( <i>dead storage</i> ) lereng U/S harus dianalisis untuk kondisi surut cepat.	1.Efektif	Surut cepat dari EL muka air normal sampai El. Muka air minimum lereng U/S dan D/S.	1.3	1.1
			Surut cepat dari El.MA maksimum sampai El.MA minimum. Pengaruh gempa diambil 0% dari koefisien gempa desain.	1.3	
4	Kondisi darurat tergantung : 1.Pembuntuan pada system drainase. 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.	1.2	
*Catatan : periksa standar tentang Metode Analisis stabilitas dinamik bendungan tipe urugan.					

(Sumber : SNI 8064:2016 ( Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Urugan))

### **3.4. Gempa**

#### **3.4.1. Umum**

Perhitungan nilai beban gempa mengikuti pedoman konstruksi 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.

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

Gempa dasar operasi (*Operating basis earthquake, OBE*) adalah 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 perbaikannya mudah jika terjadi gempa dasar operasi, tetapi tanpa memperhitungkan tinjauan keamanan terhadap kehidupan manusia.

2. 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.

#### **3.4.2. Pengaruh Tingkat Risiko Bangunan**

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

1. Klasifikasi kelas resiko

Penentuan klasifikasi kelas risiko didapatkan dengan Persamaan 3.12 dan Tabel 3.2 di bawah ini. Parameter klasifikasi kelas risiko didapatkan berdasarkan data teknis bendungan dianalisis.

$$FR_{total} = FR_k + FR_t + FR_e + FR_h \quad (3.12)$$

Dimana :

$FR_k$  = 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 Resiko Untuk Evaluasi Keamanan Bendungan**

Faktor Risiko	Angka bobot dalam kurung				
	Ekstrema	Tinggi	Moderat	Rendah	
Kapasitas ( $10^6 m^3$ ) ( $FR_k$ )	>100 (6)	100-1,25 (4)	1,00 – 0,125 (2)	<0,125 (0)	
Tinggi (m) ( $FR_t$ )	>45 (6)	45-30 (4)	30-15 (2)	<15 (0)	
Kebutuhan Evakuasi (jumlah orang) ( $FR_e$ )	>1000 (12)	1000-100 (8)	100-1 (4)	0 (0)	
Tingkat Kerusakan ( $FR_h$ )	Sangat Tinggi (12)	Tinggi (10)	Agak Tinggi (8)	Moderat (4)	Tidak Ada (0)

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

## 2. Kriteria Beban Gempa

Setelah mendapatkan nilai faktor risiko kemudian menentukan kriteria beban gempa dengan menentukan kelas risiko. Parameter penentuan kelas risiko dan kriteria beban gempa dapat dilihat pada Tabel 3.3 dan Tabel 3.4 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 : Pedoman Kontruksi Dan Bangunan Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan  
(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	3000 (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.				

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

### 3.4.3. Koefisien Gempa

Gaya gempa yang berarah horizontal dan vertikal, tetapi gaya gempa yang arah nya vertical relatif tidak seberbahaya gaya gempa yang arah nya horizontal. Koefisien Gempa tergantung dari lokasi tempat kontruksi sesuai dengan peta zona

gempa. Rumus untuk mencari Koefisien Gempa ( $f$ ) dapat dilihat di persamaan 3.13 berikut.

$$f = \frac{Ad}{g} \quad (3.13)$$

$$Ad = n (Ac \times z)^m$$

dengan:

$Ad$  : percepatan gempa (cm/dtk<sup>2</sup>),

$n/m$  : koefisien untuk jenis tanah,

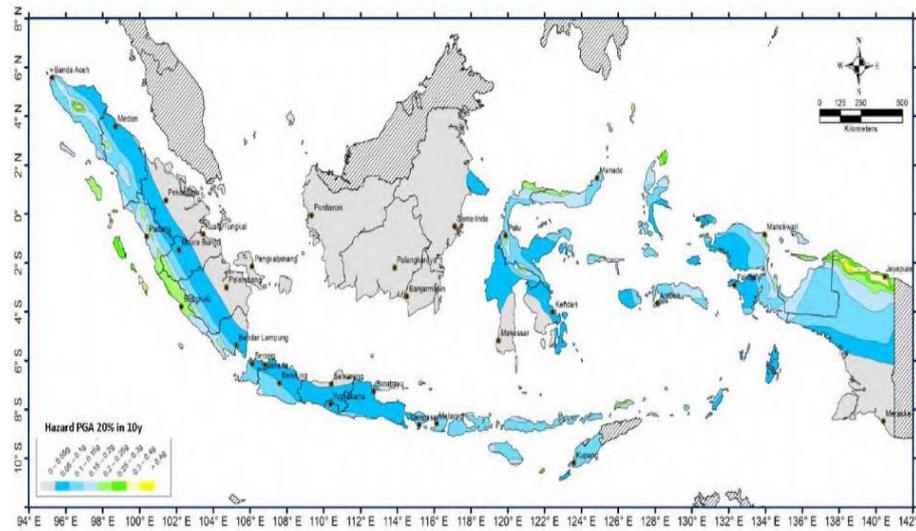
$Ac$  : percepatan kejut dasar (cm/ dtk<sup>2</sup>),

$f$  : koefisien Gempa,

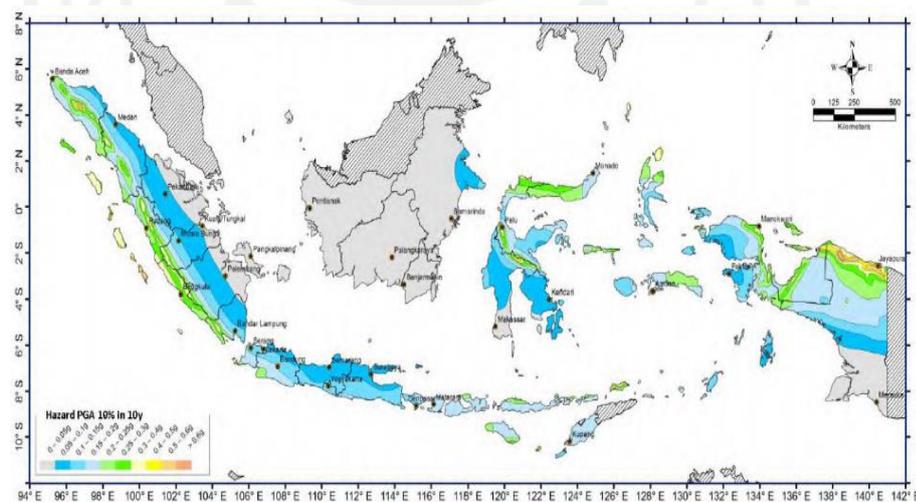
$g$  : koefisien grafitasi (9,81 m/dtk<sup>2</sup> = 981 cm/dtk<sup>2</sup>),

$z$  : koefisien zona.

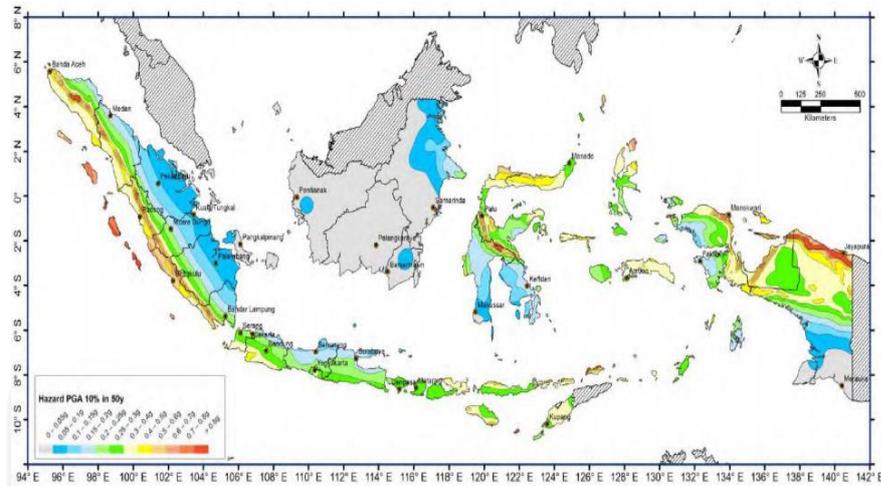
Berdasarkan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017 Hasil analisis *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) untuk peta percepatan puncak batuan dasar dapat dilihat pada Gambar 3.6 sampai Gambar 3.11.



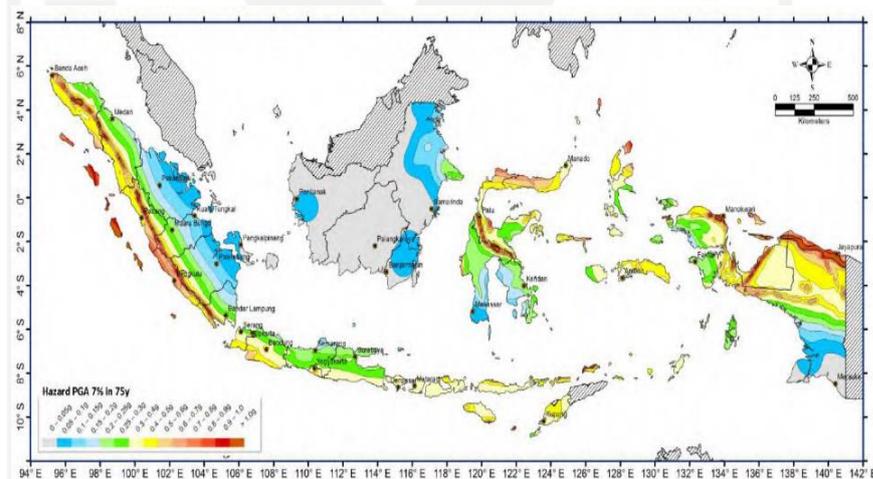
**Gambar 3. 7** Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar ( $S_B$ ) Untuk Probabilitas Terlampaui 20% Dalam 10 Tahun  
(Sumber : Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun, 2017)



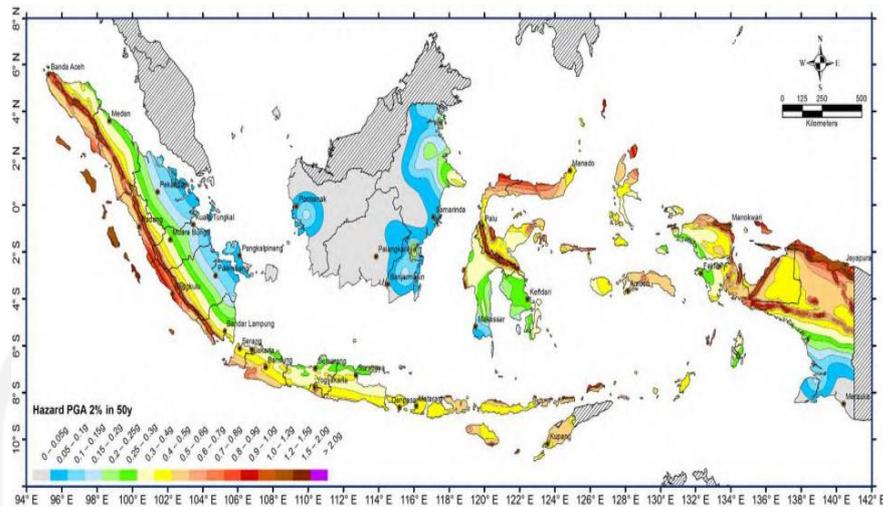
**Gambar 3. 8** Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar ( $S_B$ ) Untuk Probabilitas Terlampaui 10% Dalam 10 Tahun  
(Sumber : Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun, 2017)



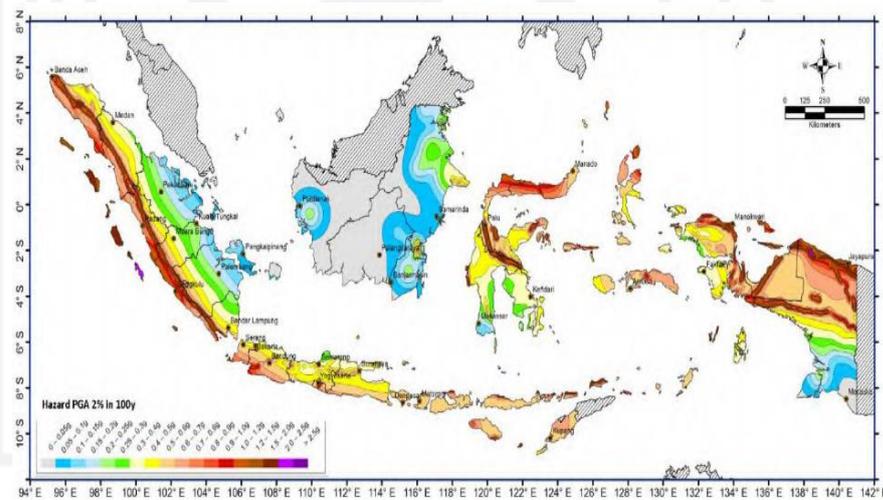
**Gambar 3. 9** Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar ( $S_B$ ) Untuk Probabilitas Terlampaui 10% Dalam 50 Tahun  
(Sumber : Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun, 2017)



**Gambar 3. 10** Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar ( $S_B$ ) Untuk Probabilitas Terlampaui 7% Dalam 75 Tahun  
(Sumber : Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun, 2017)



**Gambar 3. 11** Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar ( $S_B$ ) Untuk Probabilitas Terlampaui 2% Dalam 50 Tahun  
(Sumber : Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun, 2017)



**Gambar 3. 12** Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar ( $S_B$ ) Untuk Probabilitas Terlampaui 2% Dalam 100 Tahun  
(Sumber : Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun, 2017)

**Tabel 3. 5 Faktor Amplikasi ( $F_{PGA}$ )**

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

(Sumber : SNI 8460:2017)

### 3.5. Parameter Tanah

#### 3.5.1. Koefisien Permeabilitas

Limianto (2011) menyatakan koefisien permeabilitas adalah kemampuan tanah untuk meloloskan air melalui pori-porinya. Tanah pada kondisi jenuh dimana rongga-rongga pada tanah akan terisi oleh air, ketika rongga-rongga tanah terisi udara akan menyebabkan terjadinya perubahan kondisi tanah yang awalnya jenuh berubah menjadi tidak jenuh, yang mengakibatkan kemampuan tanah untuk meloloskan air akan berkurang. Pada saat tekanan air pori pada tanah menjadi negatif, maka semakin banyak pula rongga yang akan terisi oleh udara dan koefisien permeabilitas akan menjadi berkurang. Untuk menghitung permeabilitas tanah dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut.

$$K = \frac{Q \times L}{h \times A \times t} \quad (3.12)$$

Dimana :

K = permeabilitas (cm/detik)

Q = banyaknya air yang mengalir pada setiap pengukuran (cm<sup>3</sup>)

t = waktu pengukuran (detik)

L = tebal contoh (cm)

$h$  = tinggi permukaan air dari permukaan contoh tanah (cm)

$A$  = luas permukaan contoh tanah (cm<sup>2</sup>)

### 3.5.2. Kuat Geser Tanah

Das (1995) menyatakan kekuatan geser tanah merupakan perlawanan internal tanah per satuan luas terhadap keruntuhan atau pergeseran sepanjang bidang geser dalam tanah tersebut. Nilai parameter-parameter kekuatan geser tanah ditentukan dengan pengujian di laboratorium. Pengujian tersebut guna mengetahui kekuatan tanah terhadap gaya horizontal, dengan menentukan nilai kohesi ( $c$ ) dari sudut geser dalam ( $\phi$ ) pada suatu contoh tanah bidang geser tertentu.

Menurut Hardiyatmo (2018) parameter kuat geser tanah diperlukan untuk menganalisis kapasitas dukung tanah, stabilitas lereng, dan gaya dorong pada dinding penahan tanah. Kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Dengan dasar pengertian ini, bila tanah mengalami pembebanan akan ditahan oleh sebagai berikut.

1. Kohesi tanah yang bergantung pada jenis dan kepadatannya, tetapi tidak tergantung dari tegangan normal yang bekerja pada bidang geser.
2. Gesekan antara butir-butir tanah yang besarnya berbanding lurus dengan tegangan normal pada bidang gesernya.

### 3.5.3. Kohesi

Kohesi adalah gaya tarik menarik antara partikel dalam tanah, dinyatakan dalam satuan berat per satuan luas. Semakin besar kohesi semakin besar pula kekuatan gesernya. Nilai kohesi ( $c$ ) diperoleh dari pengujian laboratorium yaitu pengujian kuat geser langsung (*direct shear strength test*) dan pengujian triaxial (*triaxial test*). Salah satu faktor yang memengaruhi nilai kohesi adalah jarak antar molekul dan kerapatannya dalam suatu benda. Kohesi berbanding lurus dengan

kerapatan suatu benda, sehingga semakin besar kerapatan maka kohesi yg akan didapatkan semakin besar.

#### **3.5.4. Sudut Geser Dalam**

Sudut geser dalam merupakan sudut yang terbentuk dari hubungan antara tegangan geser dan tegangan normal di dalam material tanah atau batuan. Sudut geser dalam adalah sudut rekahan yang terbentuk apabila suatu material diberi gaya atau tegangan yang melebihi tegangan gesernya. Semakin besar sudut geser dalam suatu material maka material tersebut akan lebih tahan menerima tegangan luar yang diberikan. Besaran nilai sudut geser dalam ( $\phi$ ) juga berkaitan dengan tingkat kepadatan suatu jenis tanah.

### **3.6. Software Geostudio**

#### **3.6.1. Umum**

GeoStudio adalah perangkat lunak untuk pemodelan geoteknik dan geolingkungan. Kemampuannya untuk menganalisis secara akurat dan mengintegrasikan hasil dari suatu produk ke produk yang lain dalam bidang rekayasa geofisika dan ilmu bumi. Geostudio berasal dari Kanada yang dikembangkan oleh perusahaan swasta.

Karena GeoStudio yang sifatnya terintegrasi, memungkinkan untuk menggabungkan berbagai analisis yang didapatkan dari berbagai sejumlah program khusus ke dalam proyek pemodelan, dan menggunakan hasil masing-masing untuk membuat survei yang lebih rinci di survei lainnya. GeoStudio mencakup program-program berikut:

1. SLOPE/W untuk menghitung faktor keamanan dan stabilitas lereng.
2. SEEP/W untuk meneliti rembesan bawah tanah.
3. SIGMA/W untuk menganalisa tekanan geoteknik dan deformasi.

4. QUAKE/W untuk menganalisa gempa bumi yang berpengaruh terhadap perilaku tanggul, lahan, dan kemiringan lereng.
5. TEMP/W untuk menganalisa geothermal.
6. CTRAN/W adalah suatu *software* yang dapat digunakan bersama dengan SEEP/W untuk model pengangkutan zat-zat pencemar.
7. AIR/W untuk memodelkan transfer udara dalam limbah tambang dan media berpori lainnya.
8. VADOSE/W untuk memodelkan dan menghitung besarnya energi perputaran aliran air berdasarkan data iklim.

### **3.6.2. Program SLOPE/W**

Pada GeoStudio program SLOPE/W berfungsi untuk menganalisis faktor keamanan/SF (*safety faktor*) lereng. SLOPE/W digunakan untuk menganalisis masalah stabilitas baik secara sederhana maupun kompleks dengan menggunakan salah satu dari delapan metode kesetimbangan (*Limit Equilibrium*) batas untuk berbagai permukaan yang miring.

### **3.6.3. Program SEEP/W**

Pada GeoStudio program SEEP/W berfungsi untuk menganalisis rembesan air dalam tanah dan tekanan air rembesan, yang membuat material menyerap air seperti tanah dan batu.

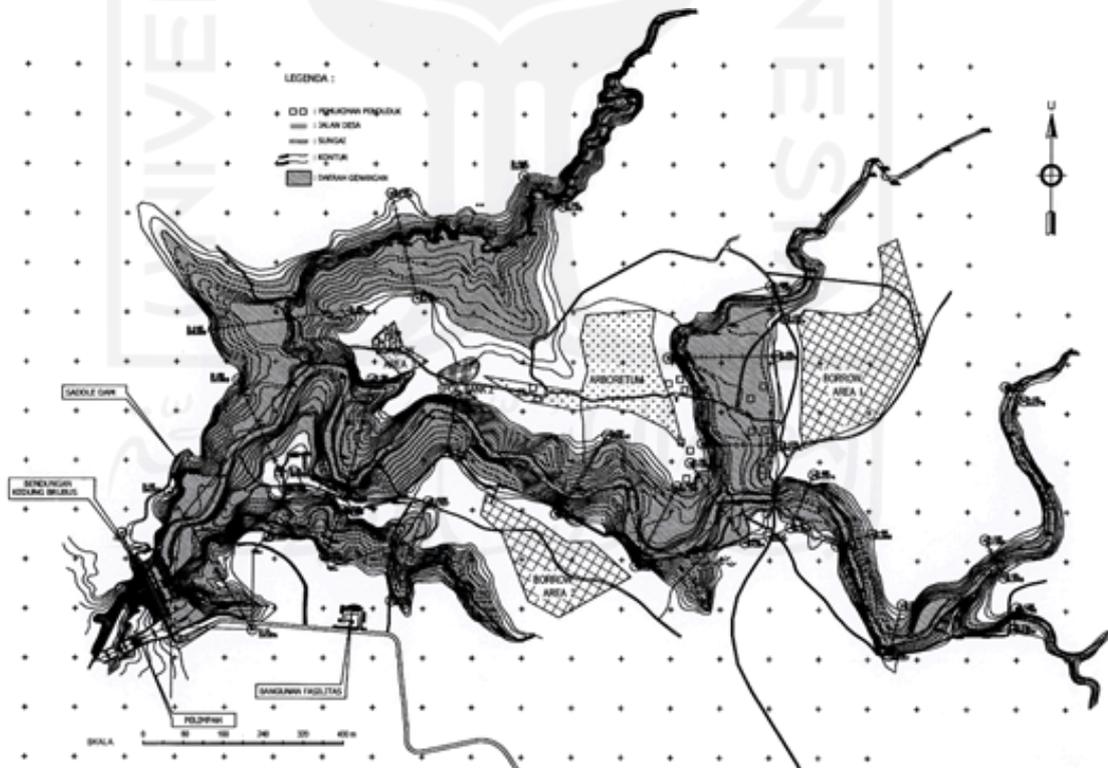
## BAB IV

### METODE PENELITIAN

#### 4.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada studi kasus Bendungan Kedung Brubus, yang berlokasi di Desa Bulu, Kecamatan Pilang Kenceng, Kabupaten Madiun, Provinsi Jawa Timur, bendungan ini bertipe urugan dengan tinggi bendungan 20 meter, lebar puncak 20 m dan panjang puncak bendungan 146 meter. Luas genangan pada elevasi muka air normal adalah 46,22 Ha dengan hujan rerata 1799 mm, volume tampungan total sebesar 2,025 juta m<sup>3</sup>.

Bendungan ini mengairi irigasi 500 Ha sawah dan irigasi suplemasi maksimum 900 Ha. Adapun letak lokasi penelitian dapat dilihat pada gambar 4.1 sebagai berikut.



**Gambar 4. 1 Situasi Waduk Kedung Brubus**

(Sumber : Laporan Inspeksi Besar Konsultan ,2020)

## 4.2. Bahan dan Alat

Alat yang digunakan dalam analisis penelitian ini sebagai berikut.

1. Perangkat keras (*Hardware*) berupa Laptop ASUS TUF F15 dengan spesifikasi intel® Core™ i5-10300H, RAM 8GB DDR3 Memory dan 500GB SSD.
2. Perangkat Lunak (*Software*) berupa GeoStudio 2012 dengan OS Windows 10.

## 4.3. Data Penelitian

Data yang akan digunakan untuk analisis berupa data sekunder yang di dapat dari pihak konsultan perencana. Beberapa data sekunder yang diperlukan dalam penelitian ini diantaranya sebagai berikut.

### 4.3.1. Data Teknis Bendungan

Data teknis Bendungan Kedung Brubus berdasarkan PT. Brahma Seta Indonesia KSO PT. Rayakosult (2020) Berikut rincian data teknis Bendungan Kedung Brubus.

1. Umum
  - a. Nama bendungan : Bendungan Kedung Brubus Lokasi
  - b. Desa : Bulu
  - c. Kecamatan : Pilang Kenceng
  - d. Kabupaten/Kota : Kabupaten Madiun
  - e. Provinsi : Jawa Timur
  - f. Pengelola : BBWS Bengawan Solo
  - g. Pelaksanaan kontruksi : 2005 – 2007
  - h. Nama sungai : Sungai Kedung Brubus
  - i. Luas DTA : 31,7 km<sup>2</sup>
  - j. Manfaat : irigasi 500 ha, Maksimum 900 ha,

konservasi, dan pariwisata

2. Waduk
  - a. Muka air maksimum (PMF) : + 110,85 m
  - b. Muka air banjir (MAB) : + 109,81 m
  - c. Muka air normal (MAN) : + 108,00 m
  - d. Muka air rendah (MAR) : + 102,92 m Volume tampungan
  - e. Tampungan total : 2,025 juta m<sup>3</sup>
  - f. Tampungan efektif : 1,467 juta m<sup>3</sup>
  - g. Tampungan mati : 0,558 juta m<sup>3</sup> Luas genangan
  - h. MAB : 63,32 ha
  - i. MAN : 46,22 ha
  - j. Hujan tahunan rerata : 1799 mm Debit banjir
  - k. Debit banjir Q1000 : 240,20 m<sup>3</sup>/detik
  - l. Debit banjir Q1/2PMF : 389,47 m<sup>3</sup>/detik
  - m. Debit banjir QPMF : 783,79 m<sup>3</sup>/detik
3. Bendungan utama
  - a. Tipe bendungan : Zonal dengan inti tegak menyatu cofferdam
  - b. Elevasi puncak : + 112,00 m
  - c. Tinggi bendungan : 20 m
  - d. Lebar puncak : 8 m
  - e. Panjang puncak : 146 m
  - f. Volume bendungan : 51.170 m<sup>3</sup>
  - g. Kemiringan lereng hulu : 1 : 2,4
  - h. Kemiringan lereng hilir : 1 : 1,9
4. Cofferdam hulu
  - a. Tipe bendungan : Urugan tanah
  - b. Elevasi puncak : + 104,50 m

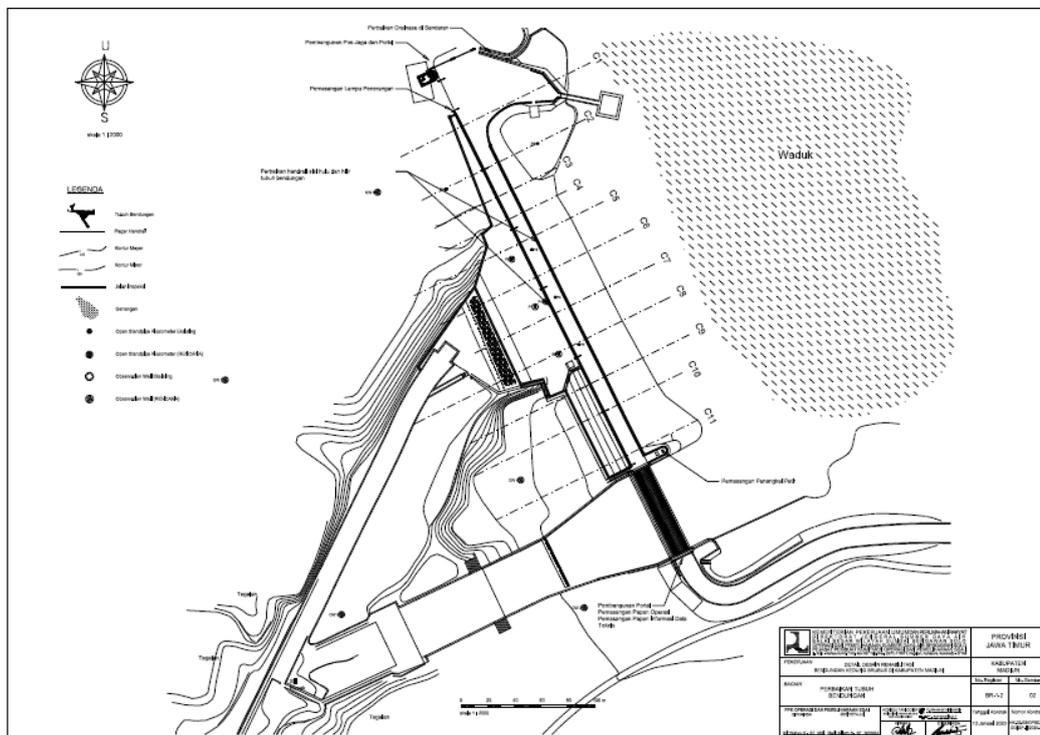
- c. Tinggi dari galian : 11 m
- d. Volume timbunan : 26.071 m<sup>3</sup>
5. Cofferdam hilir
- a. Tipe bendungan : Urugan tanah
- b. Elevasi puncak : + 100,80 m
- c. Tinggi dari galian : 8,30 m
- d. Volume timbunan : 5.024 m<sup>3</sup>
6. Pelimpah
- a. Tipe : Overflow tanpa pintu
- b. Elevasi ambang : + 108,00 m
- c. Lebar mercu : 35 m
- d. Lebar saluran transisi : 35 m mengecil 20 m
- e. Panjang saluran transisi : 38 m
- f. Lebar saluran peluncur : 20 m
- g. Panjang saluran peluncur : 36 m
- h. Panjang peredam energi : 20 m
- i. Lebar peredam energi : 20 m
7. Bangunan pengambilan
- a. Tipe bangunan : Menara tegak Dimensi menara
- Panjang : 7,3 m
  - Lebar : 6,5 m
  - Tinggi : 16 m
- b. Stoplog
- Tipe pintu : Pintu sorong
  - Dimensi : 1,00 m × 1,00 m

- Jumlah pintu : 2 set
  - Elevasi ambang pintu : + 102,20 m Stoplog B
  - Tipe pintu : Pintu sorong
  - Dimensi pintu : 1,00 m × 1,00 m
  - Jumlah pintu : 2 set
  - Katrol angkat rantai : 1 set
  - Elevasi ambang : + 98,00 m
- c. Pipa baja pengambilan
- Diameter pipa : 0,60 m
  - Elevasi ambang : + 102,20 m
  - Elevasi keluaran : + 99,00 m
  - Jumlah pipa : 2 set Pintu irigasi
  - Tipe pintu : Pintu sorong bonet
  - Dimensi pintu : 1,00 m × 1,00 m
  - Jumlah pintu : 2 set
  - Sistem operasi pintu : Elektrik dan manual
  - Elevasi ambang : + 98,00 m
8. Bangunan pengeluaran
- a. Tipe bangunan : konduit
  - b. Bentuk : persegi
  - c. Dimensi : 2,50 × 2,50 × 2 buah
  - d. Panjang saluran : 113,55 m
9. Instrumentasi
- a. Pisometer : 5 buah stand pipe, 17 buah pneumatik
  - b. Patok geser : 20 buah, 8 di puncak dan 12 di lereng hilir
  - c. Sumur pengamatan : 1 buah

- d. V-notch : 1 buah  
 e. Stasiun hujan : 1 buah

#### 4.3.2. Data Geometri Bendungan

Geometri Bendungan Bendung Brubus didapatkan berdasarkan PT. Brahma Seta Indonesia KSO PT. Rayakosult (2020) Berikut gambar peta situasi dan potongan melintang Bendungan Kedung Brubus dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 4. 2 Peta Situasi Tubuh Bendungan Kedung Brubus

### 4.3.3. Data tanah

Data tanah Bendungan Bendung Brubus didapatkan berdasarkan PT. Brahma Seta Indonesia KSO PT. Rayakosult (2020) Berikut data tanah Bendungan Kedung Brubus dapat dilihat sebagai berikut.

**Tabel 4. 1 Hasil Uji Material Timbunan Zona Inti pada Pelaksanaan Pekerjaan Timbunan**

Nama Sampel				TPT.1	TPT.2	TPT.3	TPT.4
Kedalaman				0,20 - 2,30	0,20 - 3,00	0,20 - 2,80	0,20 - 2,50
Lokasi				Borrow	Borrow	Borrow	Borrow
Pekerjaan				S & I 2006			
Properties Test	Natural Water Content	W	(%)	25.46	32.35	20.91	24.87
	Specific Gravity of Soil	G <sub>s</sub>	App	2.662	2.591	2.674	2.691
	Wet Density	γ <sub>t</sub>	(gr/cm <sup>3</sup> )	1.903	1.805	1.902	1.914
Grain Size	Proportion	Gravel Part	(%)	13.57	12.54	36.01	25.29
		Sand Part	(%)	33.93	19.1	21.51	34.9
		Silt Part	(%)	29.03	19.85	19.53	19.3
		Clay Part	(%)	23.47	48.5	22.95	20.51
	Max. Diameter		(mm)	38.1	25.4	50.8	50.8
	60% Diameter	D 60	(mm)	0.17	0.027	2.1	0.56
	10% Diameter	D 10	(mm)				
Consistency	Passing #200			52.5	68.35	42.48	39.81
	Classification			Clayey Loam	Clay	Clay	Clayey Loam
	Liquid Limit	LL	(%)	47.09	67.53	51.85	54.83
	Plastic Limit	PL	(%)	23.86	28.62	28.1	25.64
	Plasticity Index	PI	(%)	23.23	38.91	23.75	29.19
	Flow Index	FI	(%)	13.16	19.26	15.22	16.87
	Unified Classification			CL	CH	CH	CH
Permeability	K		(cm/sec)	1.503 E-07	8.527 E-07	3.346 E-07	5.436 E-07
	D <sub>max</sub>		(gr/cm <sup>3</sup> )	1.56	1.412	1.558	1.559
Compaction	OMC		(%)	22.00	27.80	22.10	22.80
Triaxial Test	Cohesion	UU	C (kg/cm <sup>2</sup> )	0.47	0.504	0.445	0.406
	Int. Fric. Angle		φ	14° 23' 29"	14° 54' 32"	15° 10' 42"	13° 10' 34"
	Cohesion	Total	C (kg/cm <sup>2</sup> )	0.384	0.448	0.419	0.407
	Int. Fric. Angle		φ	15° 01' 41"	15° 29' 43"	16° 06' 07"	14° 16' 37"
	Cohesion	Eff	C (kg/cm <sup>2</sup> )	0.368	0.474	0.401	0.388
	Int. Fric. Angle		φ	17° 22' 06"	17° 56' 58"	18° 35' 49"	16° 42' 56"
Consolidation	Initial Void Ratio			0.712	0.848	0.737	0.741
	Preconsolidation Load		(kg/cm <sup>2</sup> )	1.860	2.100	1.840	1.280
	Compression Index			0.307	0.468	0.316	0.24
	Coef. Of Consolidation		(cm <sup>2</sup> /sec)	1.900 E-02	1.250 E-02	1.900 E-02	1.580 E-02
	Coef Of Vol. Comp		(cm <sup>2</sup> /gr)	2.900 E-05	3.200 E-05	2.900 E-05	3.300 E-05
	Coef Of Permeability		(cm/sec)	5.500 E-07	4.200 E-07	5.600 E-07	5.200 E-07

**Tabel 4. 2 Hasil Uji Material Timbunan Zona Random pada Pelaksanaan Pekerjaan Timbunan**

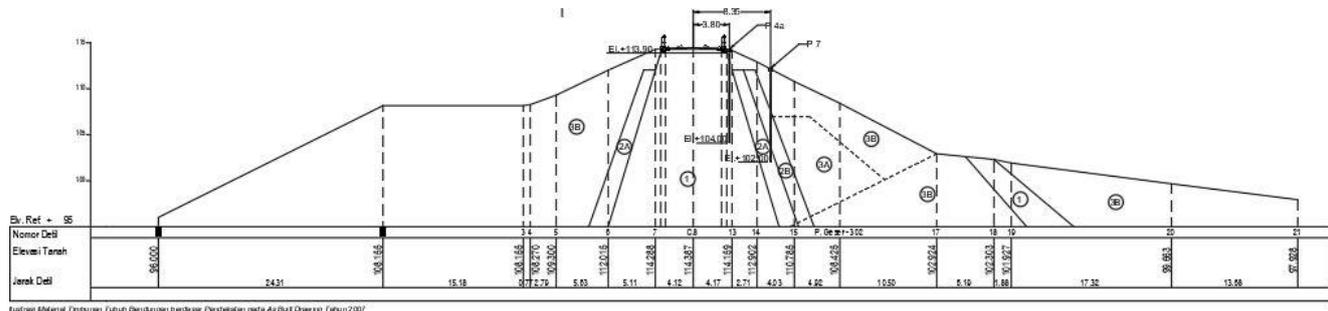
Nama Sample				1	2	3	4	5	6
Lokasi Material				Stock Pile Random Bongkah Dam Excavation	Stock Pile Random Hancur Dam Excavation	TP. 6 Filter Kedung Madok Borrow Area	Conduit Random Bongkah	Outlet Spillway Random Bongkah	Outlet Spillway Random Bongkah
Asal Material									
Waktu Pengujian				Investigasi 2006	Investigasi 2006	Investigasi 2006	Investigasi 2006	Investigasi 2006	Investigasi 2006
Proporties Test	Natural Water Content	W	%	3.27	7.38	14.2	4.55	7.81	5.4
	Specific Gravity of Soil	Gs	App	2.531	2.634		2.534	2.554	2.528
	Wet Density	Dt	(gr/cm <sup>3</sup> )	1.664	2.033		2.24	2.229	2.219
	Dry Density						2.143	2.068	2.105
	Void Ratio						0.183	0.235	0.201
	Saturated Density						2.297	2.258	2.273
	Submerged Density						1.297	1.258	1.273
	Degree of Saturation						83.1	64.77	67.99
Specific Gravity	Bulk Dry Basis Sand					2.354			
	SSD Condition Sand					2.486			
	SG Apparent Sand					2.71			
	Absorbtion Sand		%			5.58			
Permeability	K	(cm/sec)	3.62 E-05	5.077 E-05	2.962 E-03				
Compaction	Dd maxOpt. Moisture content		(gr/cm <sup>3</sup> )	1.294	1.734				
	Minimum Density		(gr/cm <sup>3</sup> )	28.6	17.22				
	Maximum Density		(gr/cm <sup>3</sup> )			1.494/1.678			
Direct Shear test	Cohesion	C	(kg/cm <sup>2</sup> )	0.55	0.528		0.681	0.686	0.697
	Int. Fric. Angle	φ		26° 22' 21"	25° 36' 57"		25° 36' 57"	24° 27' 46"	26° 59' 44"

#### 4.4. Parameter Material Bendungan

**Tabel 4. 3 Parameter Material Bendungan Kedung Brubus**

Zona	Material	Berat Isi		Kohesi	Phi	Permeabilitas
		$\gamma_{sat}$	$\gamma_{wet}$			
		ton/m <sup>3</sup>	ton/m <sup>3</sup>	ton/m <sup>2</sup>	°	cm/detik
1	Inti	1,986	1,881	0,41	17,56	$6,95 \times 10^{-6}$
2a	Filter halus	2,235	1,912	0,00	30,00	$2,74 \times 10^{-3}$
2b	Filter kasar	2,235	1,981	0,00	30,00	$2,83 \times 10^{-3}$
3a	Random hancur	2,276	2,033	0,53	25,61	$3,85 \times 10^{-4}$
3b	Random bongkah	2,276	2,088	0,65	25,86	$4,65 \times 10^{-4}$
4b	Rip-rap	2,180	1,940	0,00	38,00	$5,0 \times 10^{-1}$

Sumber – Laporan Akhir Konstruksi Pembangunan Bendungan Kedung Brubus (2007)



PENEMPATAN OSP BARU PADA CS P.4  
 skala 1 : 500

**Gambar 4. 3 Potongan Melintang Bendungan Kedung Brubus**

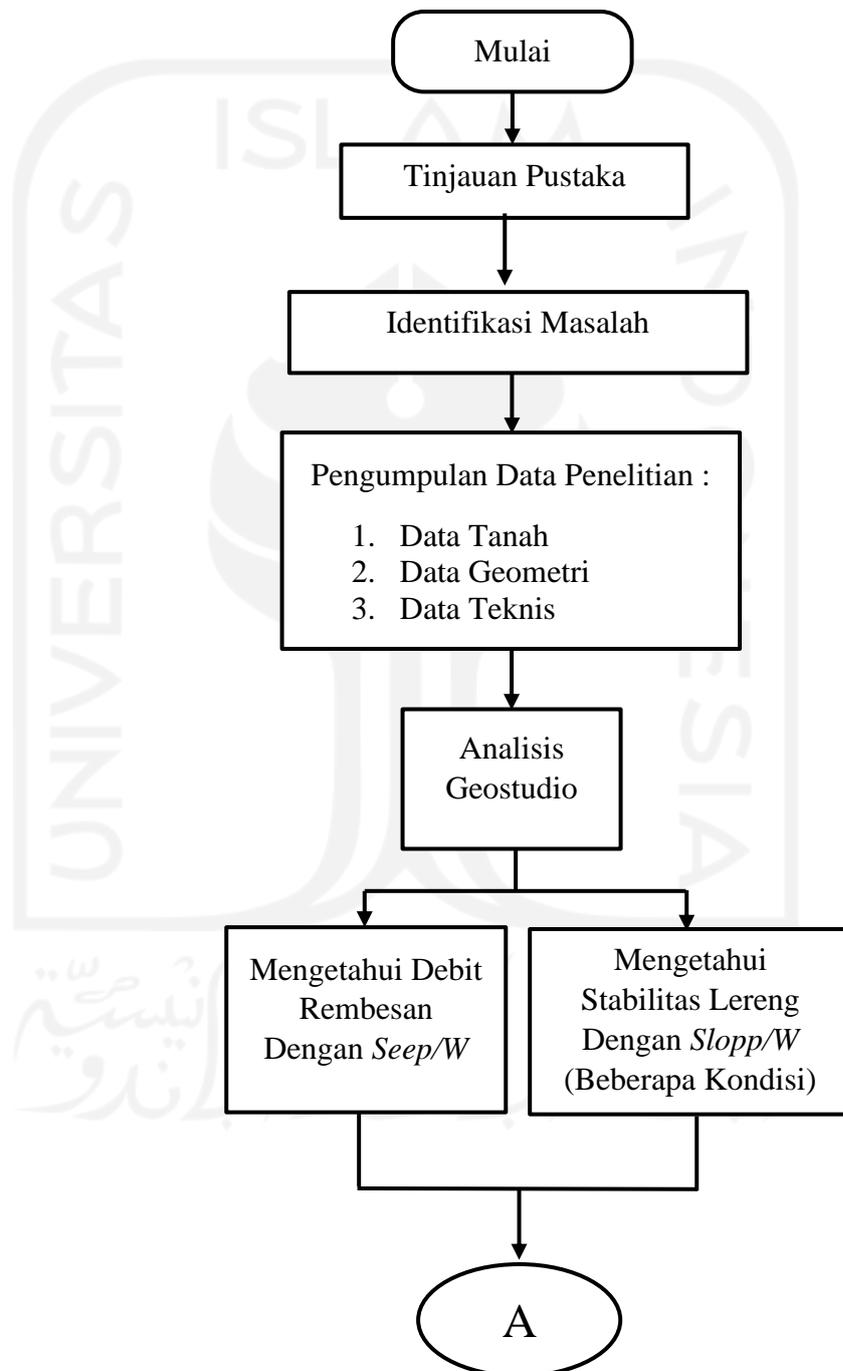
#### 4.5. Metode Penelitian

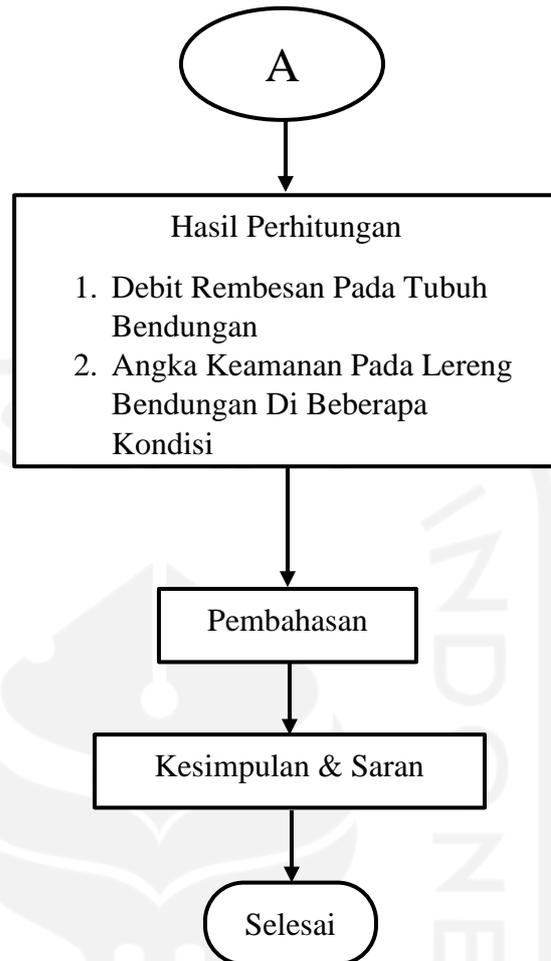
##### 1. Metode Pemodelan Software

Metode Pemodelan Software pada penelitian ini menggunakan GeoStudio, dimana untuk perhitungan rembesan menggunakan program SEEP/W dan perhitungan stabilitas menggunakan program SLOPE/W. Selengkapnya dapat dilihat pada Sub BAB 3.6

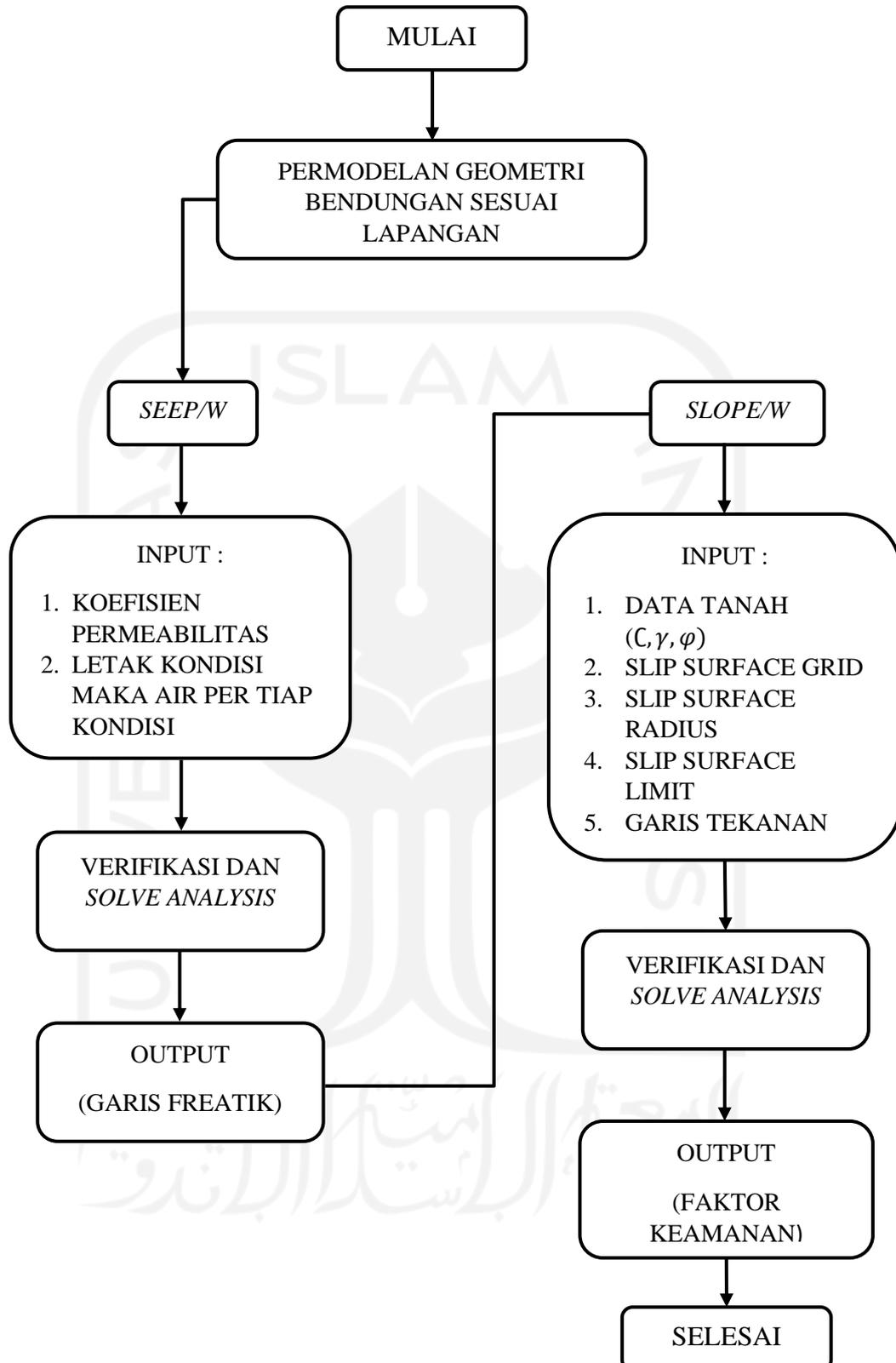
#### 4.6. Bagan Aliran

Bagan Alir Penelitian dan bagan alir pemodelan GeoStudio dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 berikut ini.





**Gambar 4. 4 Bagan Aliran Penelitian**



**Gambar 4. 5 Bagan Aliran Pemodelan Software**

## BAB V

### PEMBAHASAN

#### 5.1. Analisis Tingkat Resiko Bendungan

Penentuan tingkat risiko bendungan dilakukan untuk mengetahui klasifikasi kelas risiko dengan mengikuti Tabel 3.2. Berikut ini perhitungan analisis tingkat risiko bendungan dapat dilihat pada Tabel 5.1.

**Tabel 5. 1 Tingkat Risiko Bendungan**

No	Faktor risiko		Kategori	Nilai
1	Faktor risiko kapasitas tampung (FRk)	2,025 juta m <sup>3</sup>	Tinggi	4
2	Faktor risiko tinggi bendungan (FRt)	20 m	Ekstrim	2
3	Faktor risiko kebutuhan evakuasi (FRe)	>1000	Ekstrim	12
4	Faktor risiko tingkat kerusakan(FRh)	Tinggi	Tinggi	12
Jumlah				30

Faktor tingkat kerusakan dalam kategori tinggi didasarkan hasil penilaian *risk score* yang dilakukan oleh konsultan guna melakukan rencana tanggap darurat (RTD) Bendungan Kedung Brubus.

Setelah didapatkan nilai faktor risiko selanjutnya yaitu menentukan kriteria beban gempa dengan menentukan kelas risiko. Berdasarkan perhitungan tingkat risiko Bendungan Kedung Brubus memiliki nilai 30. Sehingga berdasarkan Tabel 3.3 Bendungan Kedung Brubus termasuk kelas risiko III (Tinggi).

Bendungan Kedung Brubus tergolong bendungan kelas risiko III (Tinggi) sehingga kriteria beban gempa dengan mengikuti Tabel 3.4 untuk desain bendungan untuk gempa OBE menggunakan tahun kala ulang 100 tahun sedangkan untuk gempa MDE menggunakan kala ulang gempa 5.000 tahun.

## 5.2. Koefisien Gempa

Perhitungan nilai beban gempa dilakukan berdasarkan nilai koefisien pada peta gempa sesuai dengan jenis gempa OBE (Gambar 3.9) dan MDE (Gambar 3.10).

Pada kondisi gempa (OBE) diambil nilai  $A_d$  sebesar 0,1 dan kondisi gempa (MDE) diambil nilai  $A_d$  sebesar 0,4 dilakukan perhitungan dengan rumus 3.11 sebagai berikut.

### 1. Perhitungan gempa OBE

$$\begin{aligned} A_d &= 0,1 \\ g &= 0,981 \text{ dm/s}^2 \\ f &= 0,1/0,981 \\ &= 0,1019 \\ K &= 0,1019 \times 0,7 \\ &= 0,07133 \text{ KN} \end{aligned}$$

### 2. Perhitungan gempa MDE

$$\begin{aligned} A_d &= 0,4 \\ g &= 0,981 \text{ dm/s}^2 \\ f &= 0,4/0,981 \\ &= 0,407 \\ K &= 0,407 \times 0,7 \\ &= 0,285 \text{ KN} \end{aligned}$$

## 5.3. Analisis Rembesan Tubuh Bedungan

Pada analisis debit rembesan menggunakan SEEP/W perlu memasukan parameter tanah berupa nilai permeabilitas setiap lapisan tanah. Berdasarkan data tanah pada Bab IV, berikut ini parameter tanah yang digunakan untuk menganalisis rembesan di tubuh Bendungan Kedung Brubus yang dapat dilihat pada Tabel 5.2.

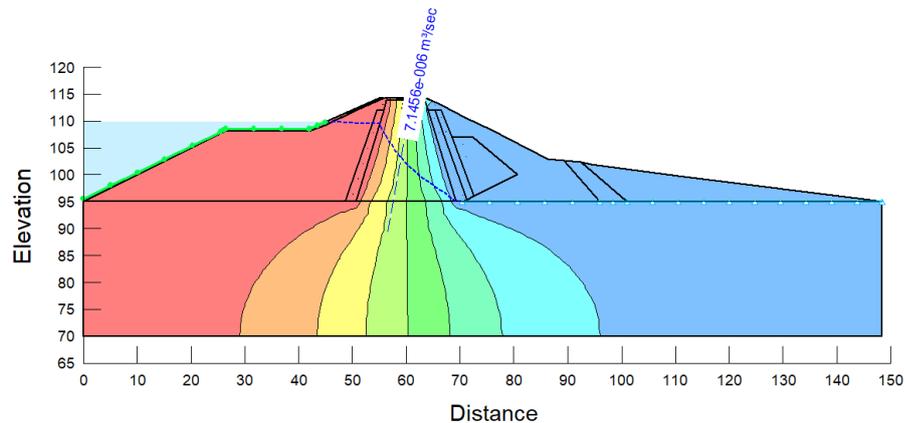
**Tabel 5. 2 Parameter Lapisan Tanah Untuk Analisis Rembesan**

No	Lapis Tanah	Nilai Permeabilitas (cm/s)
1	Inti Lempung	$6,95 \times 10^{-6}$
2	Filter Halus	$2,74 \times 10^{-3}$
3	Filter Kasar	$2,83 \times 10^{-3}$

No	Lapis Tanah	Nilai Permeabilitas (cm/s)
3	Random	$3,85 \times 10^{-4}$
4	Rip-rap	$5,0 \times 10^{-1}$
5	Pondasi	$1,0 \times 10^{-4}$

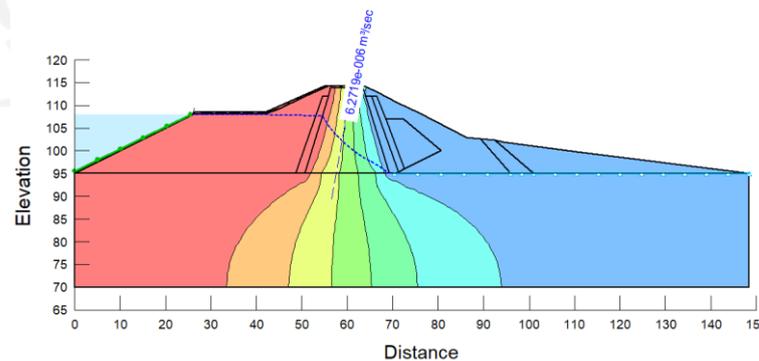
### 5.3.1. Analisis Debit Rembesan

Berikut ini hasil perhitungan debit rembesan dengan menggunakan SEEP/W dapat dilihat pada Gambar 5.1 sampai Gambar 5.3.



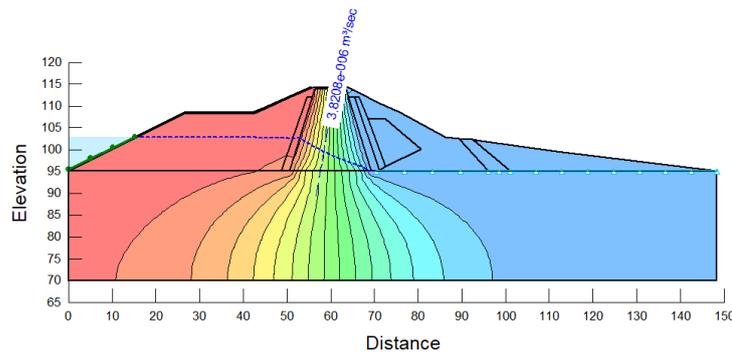
**Gambar 5. 1 Output Perhitungan Debit Rembesan Keadaan MAB Pada SEEP/W**

Berdasarkan *output* dari perhitungan menggunakan SEEP/W, debit rembesan yang terjadi pada tubuh Bendungan Kedung Brubus dalam kondisi muka air banjir sebesar  $7,46 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ . Panjang tubuh Bendungan Kedug Brubus yaitu sebesar 146 m, sehingga total rembesan yang terjadi pada tubuh bendungan dalam kondisi muka air banjir sebesar  $1,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Gambar 5. 2 Output Perhitungan Debit Rembesan Keadaan MAN Pada SEEP/W**

Berdasarkan *output* dari perhitungan menggunakan SEEP/W, debit rembesan yang terjadi pada tubuh Bendungan Kedung Brubus dalam kondisi muka air normal sebesar  $6,21 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ . Panjang tubuh Bendungan Kedung Brubus yaitu sebesar 146 m, sehingga total rembesan yang terjadi pada tubuh bendungan dalam kondisi muka air normal sebesar  $9,046 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

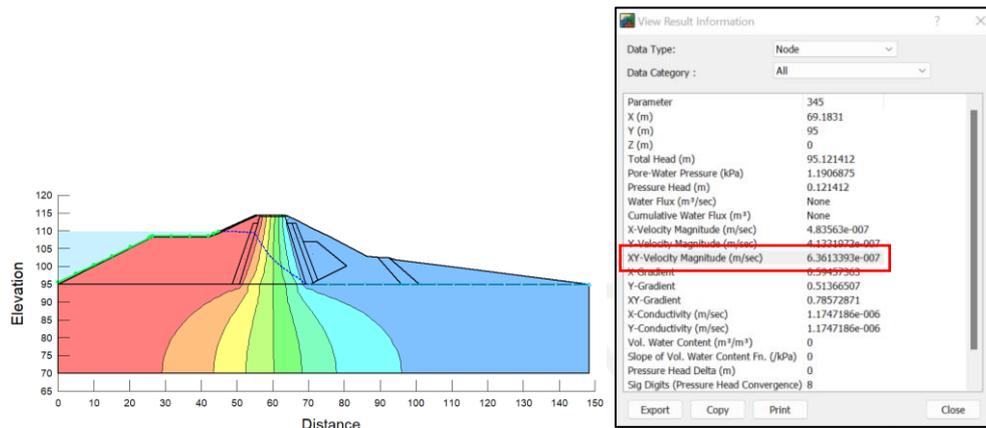


**Gambar 5.3 Output Perhitungan Debit Rembesan Keadaan MAM  
Pada SEEP/W**

Berdasarkan *output* dari perhitungan menggunakan SEEP/W, debit rembesan yang terjadi pada tubuh Bendungan Kedung Brubus dalam kondisi muka air minimum sebesar  $3,82 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ . Panjang tubuh Bendungan Kedung Brubus yaitu sebesar 146 m, sehingga total rembesan yang terjadi pada tubuh bendungan dalam kondisi muka air minimum sebesar  $5,58 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

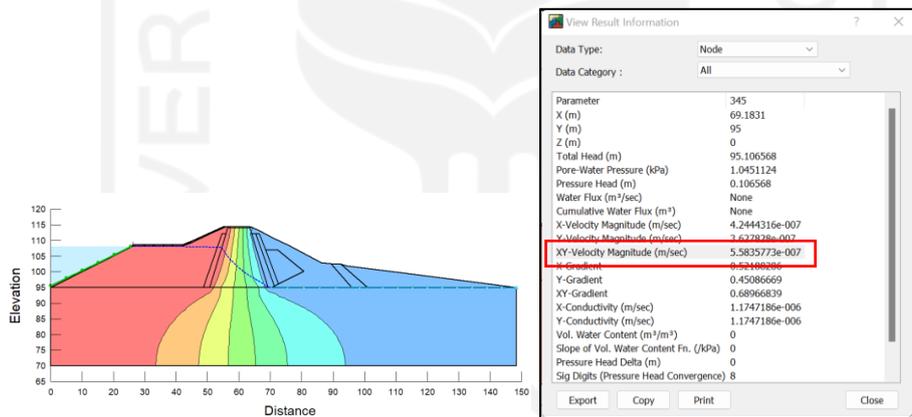
### 5.3.2. Analisis Kecepatan Rembesan

Berikut ini hasil perhitungan kecepatan rembesan dengan menggunakan SEEP/W dapat dilihat pada Gambar 5.4 sampai Gambar 5.6.



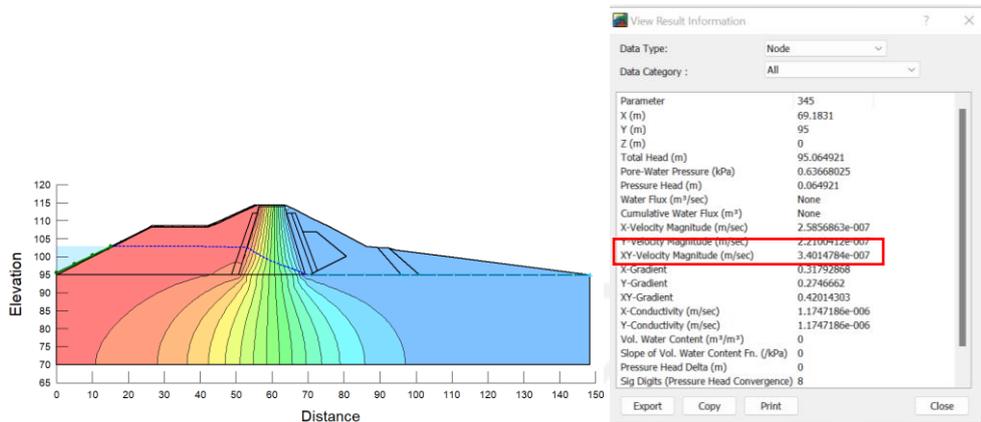
**Gambar 5. 4 Output Perhitungan Kecepatan Rembesan Keadaan MAB Pada SEEP/W**

Berdasarkan *output* dari perhitungan menggunakan SEEP/W, kecepatan aliran filtrasi yang terjadi pada tubuh Bendungan Kedung Brubus dalam kondisi muka air banjir sebesar  $6,36 \times 10^{-7}$  m/s.



**Gambar 5. 5 Output Perhitungan Kecepatan Rembesan Keadaan MAN Pada SEEP/W**

Berdasarkan *output* dari perhitungan menggunakan SEEP/W, kecepatan aliran filtrasi yang terjadi pada tubuh Bendungan Kedung Brubus dalam kondisi muka air normal sebesar  $5,58 \times 10^{-7}$  m/s.



**Gambar 5. 6 Output Perhitungan Kecepatan Rembesan Keadaan MAM Pada SEEP/W**

Berdasarkan *output* dari perhitungan menggunakan SEEP/W, kecepatan aliran filtrasi yang terjadi pada tubuh Bendungan Kedung Brubus dalam kondisi muka air minimum sebesar  $3,406 \times 10^{-7}$  m/s.

Pemeriksaan piping dilakukan salah satunya dengan membandingkan kecepatan rembesan dengan Kecepatan kritis yang diizinkan. Berikut ini hasil perhitungan kecepatan kritis berdasarkan Persamaan 3.6 sampai dengan Persamaan 3.8.

$$d = 0,0025 \text{ mm}$$

$$= 0,00025 \text{ cm}$$

$$W = (2,67-1) \times \frac{1}{6} \times 3,14 \times 0,00025^3$$

$$= 1,365 \times 10^{-11}$$

$$F = \frac{1}{4} \times 3,14 \times 0,00025^2$$

$$= 4,906 \times 10^{-8}$$

$$V_c = \sqrt{\frac{1,365 \times 10^{-11} \times 980}{4906 \times 10^{-8} \times 1}}$$

$$= 0,511 \text{ cm/det}$$

$$= 0,00511 \text{ m/s}$$

$$= 5,1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

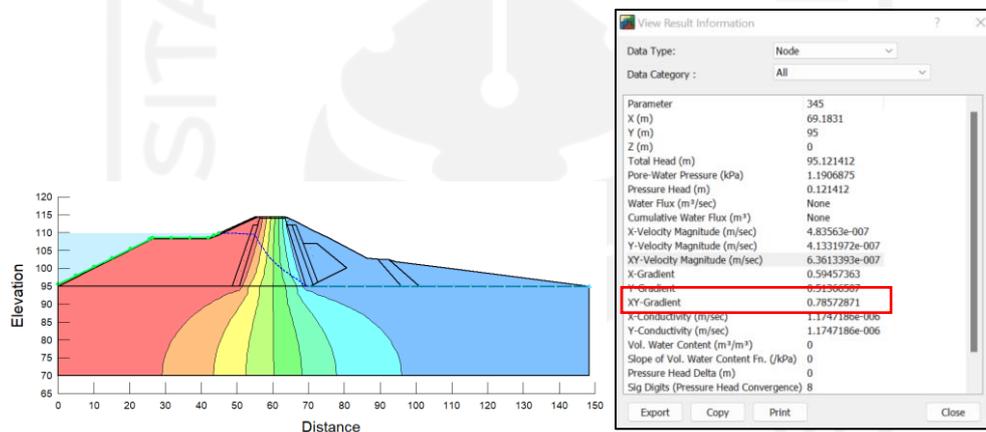
### 5.3.3. Analisis Gradien Hidraulik Rembesan

Hasil dari  $i$  actual pada kondisi muka air banjir ( $h$ = secara manual didapatkan dengan persamaan 3.11 sebagai berikut.

$$i_e = \frac{h}{L} = \frac{14,81}{19,1}$$

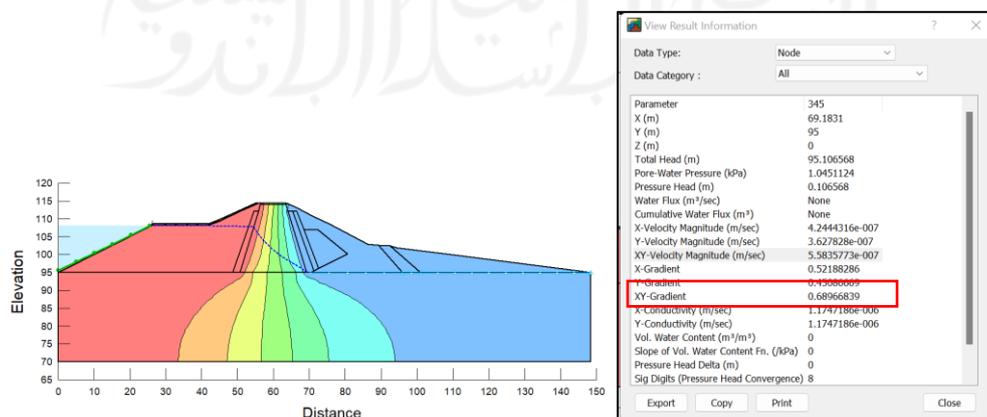
$$= 0,784$$

Berikut ini hasil perhitungan Gradien Hidraulik rembesan dengan menggunakan SEEP/W dapat dilihat pada Gambar 5.7 sampai Gambar 5.9.



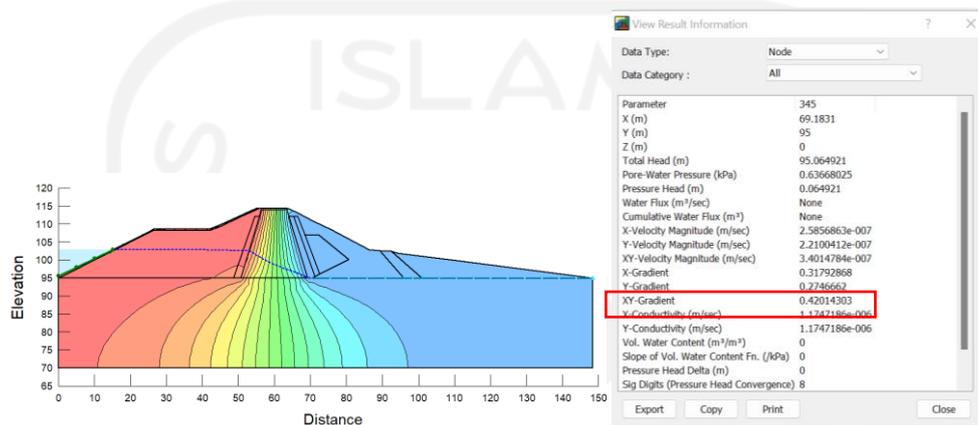
**Gambar 5.7 Output Perhitungan Gradien Hidraulik Keadaan MAB Pada SEEP/W**

Berdasarkan *output* dari perhitungan menggunakan SEEP/W, gradien hidraulik yang terjadi pada tubuh Bendungan Kedung Brubus dalam kondisi muka air banjir sebesar 0,78.



**Gambar 5. 8 Output Perhitungan Gradien Hidraulik Keadaan MAN Pada SEEP/W**

Berdasarkan *output* dari perhitungan menggunakan SEEP/W, gradien hidraulik yang terjadi pada tubuh Bendungan Kedung Brubus dalam kondisi muka air normal sebesar 0,68.



**Gambar 5. 9 Output Perhitungan Gradien Hidraulik Keadaan MAM Pada SEEP/W**

Berdasarkan *output* dari perhitungan menggunakan SEEP/W, gradien hidraulik yang terjadi pada tubuh Bendungan Kedung Brubus dalam kondisi muka air minimum sebesar 0,42.

Berdasarkan data tanah yang didapatkan parameter tanah pada lapisan inti yaitu nilai Berat jenis (Gs) sebesar 2,59 dan angka pori (e) sebesar 1,04. Berikut ini hasil perhitungan gradien hidrolis kritis ( $i_c$ ) dengan Persamaan 3.8 sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 i_c &= \frac{(2,59-1)}{1+1,04} \\
 &= 0,779 \text{ dibulatkan menjadi } 0,78
 \end{aligned}$$

#### 5.4. Analisis Stabilitas Lereng Tubuh Bendungan

Pada analisis debit rembesan menggunakan SLOPE/W perlu memasukan parameter tanah berupa nilai berat volume, kohesi dan sudut geser setiap lapisan tanah. Berdasarkan data tanah pada Bab IV, berikut ini parameter tanah yang

digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng di tubuh bendungan Kedung Brubus yang dapat dilihat pada Tabel 5.3.

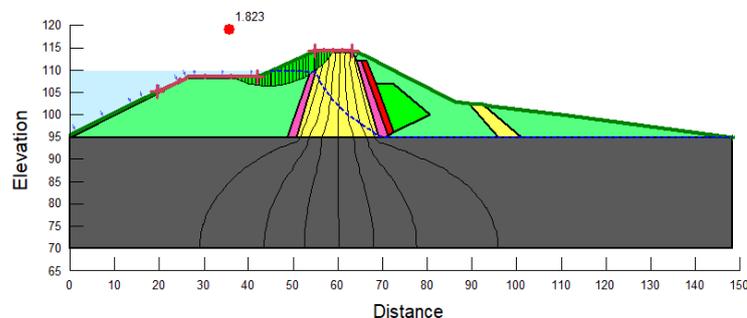
**Tabel 5. 3 Parameter Lapisan Tanah Untuk Analisis Stabilitas Lereng**

Zona	Material	Berat Isi		Kohesi <i>ton/m<sup>2</sup></i>	Phi <i>°</i>
		$\gamma_{sat}$ <i>ton/m<sup>3</sup></i>	$\gamma_{wet}$ <i>ton/m<sup>3</sup></i>		
1	Inti	1,986	1,881	0,41	17,56
2a	Filter halus	2,235	1,912	0,00	30,00
2b	Filter kasar	2,235	1,981	0,00	30,00
3a	Random hancur	2,276	2,033	0,53	25,61
3b	Random bongkah	2,276	2,088	0,65	25,86
4	Rip-rap	2,180	1,940	0,00	38,00
	Pondasi	Dimodelkan sebagai <i>bedrock</i>			

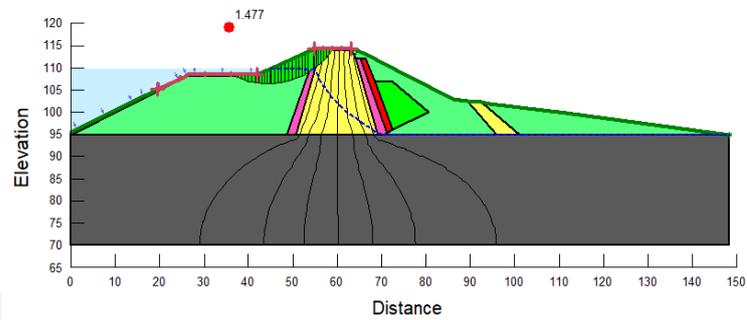
Dari beberapa tinjauan yang dilakukan berikut ini beberapa kondisi yang ditinjau diantaranya kondisi muka air banjir, kondisi muka air normal, kondisi muka air minimum dan surut cepat.

#### 5.4.1. Kondisi Muka Air Banjir

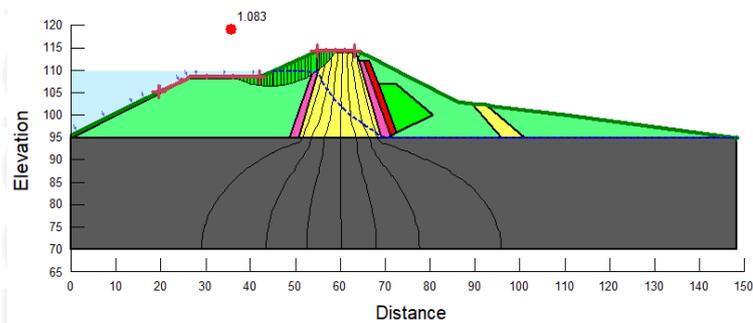
Berikut ini hasil analisis menggunakan SLOPE/W pada lereng hulu dan hilir dengan tinjauan tanpa gempa, gempa OBE dan gempa MDE sebagai berikut.



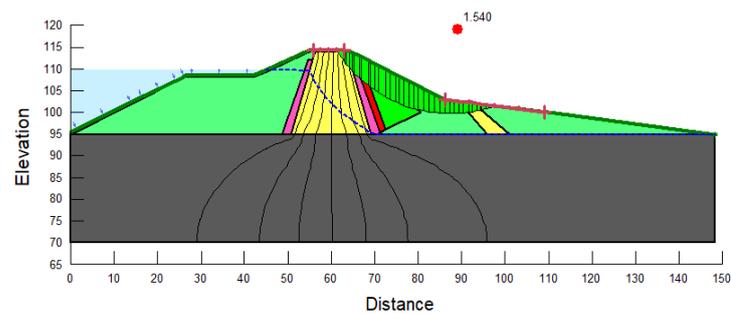
**Gambar 5. 10 Hasil Geostudio Kondisi MAB Lereng Hulu Tanpa Gempa**



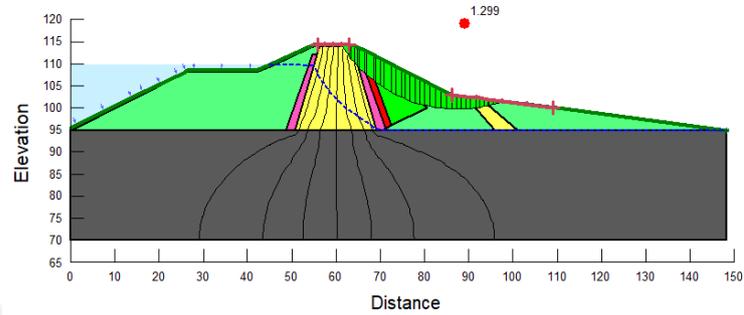
**Gambar 5. 11 Hasil Geostudio Kondisi MAB Lereng Hulu Gempa OBE**



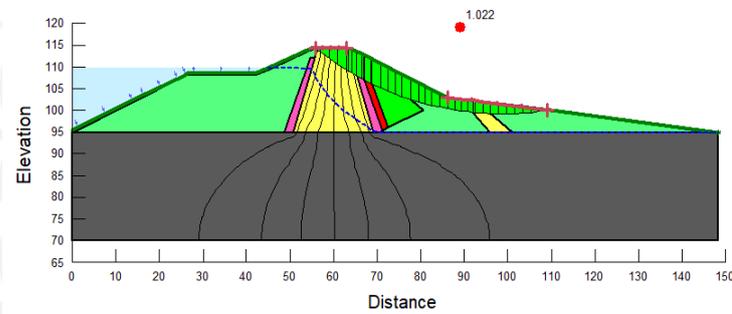
**Gambar 5. 12 Hasil Geostudio Kondisi MAB Lereng Hulu Gempa MDE**



**Gambar 5. 13 Hasil Geostudio Kondisi MAB Lereng Hilir Tanpa Gempa**



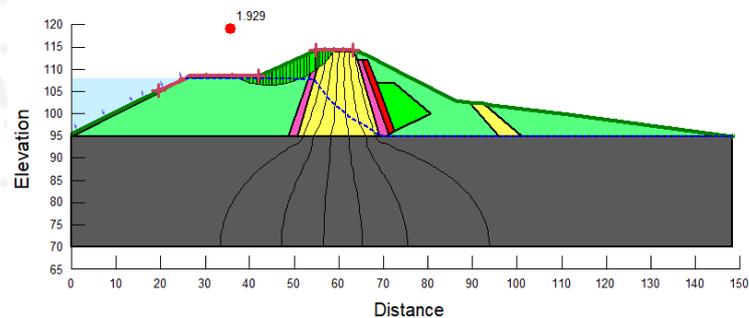
**Gambar 5. 14 Hasil Running Kondisi MAB Lereng Hilir Gempa OBE**



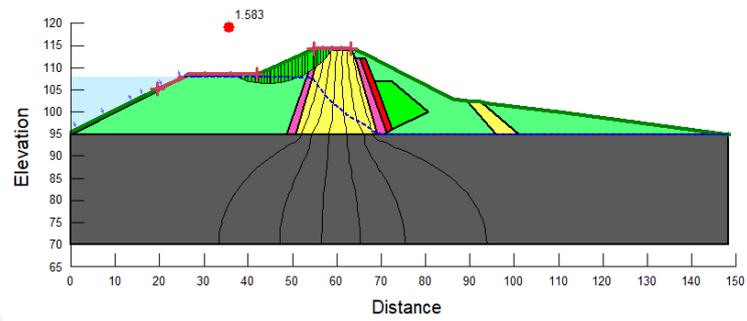
**Gambar 5. 15 Hasil Running Kondisi MAB Lereng Hilir Gempa MDE**

#### 5.4.2. Kondisi Muka Air Normal

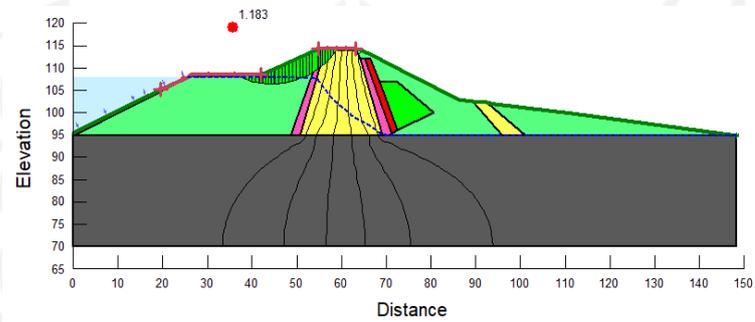
Berikut ini hasil analisis menggunakan SLOPE/W pada lereng hulu dan hilir dengan tinjauan tanpa gempa, gempa OBE dan gempa MDE sebagai berikut.



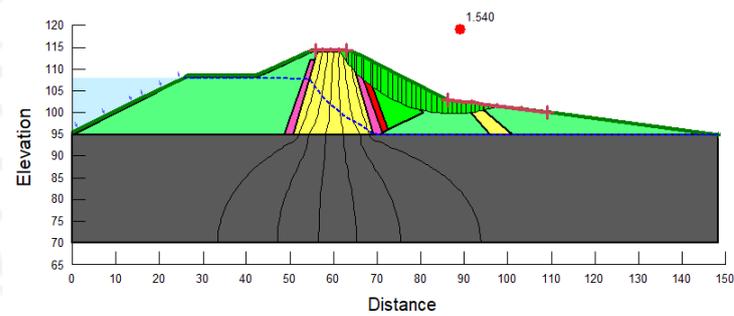
**Gambar 5. 16 Hasil Running Kondisi MAN Lereng Hulu Tanpa Gempa**



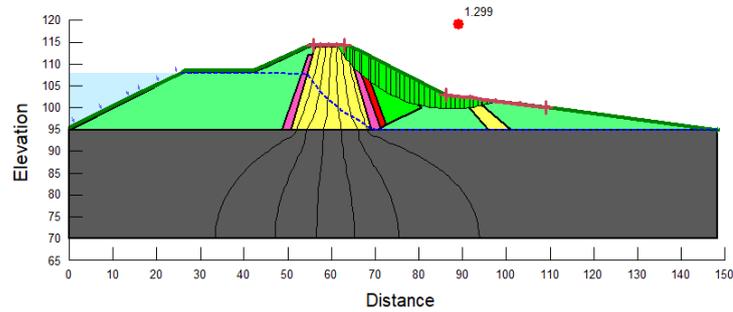
**Gambar 5. 17 Hasil Running Kondisi MAN Lereng Hulu Gempa OBE**



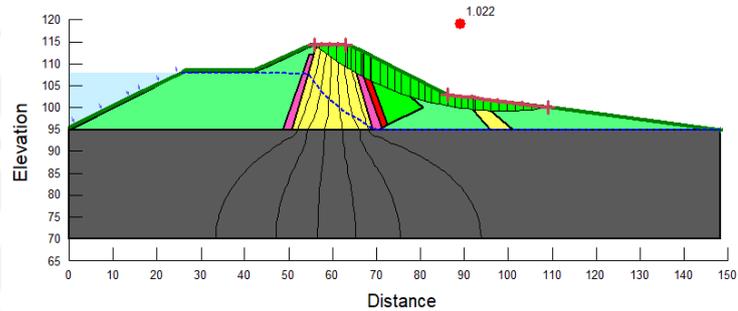
**Gambar 5. 18 Hasil Running Kondisi MAN Lereng Hulu Gempa MDE**



**Gambar 5. 19 Hasil Running Kondisi MAN Lereng Hilir Tanpa Gempa**



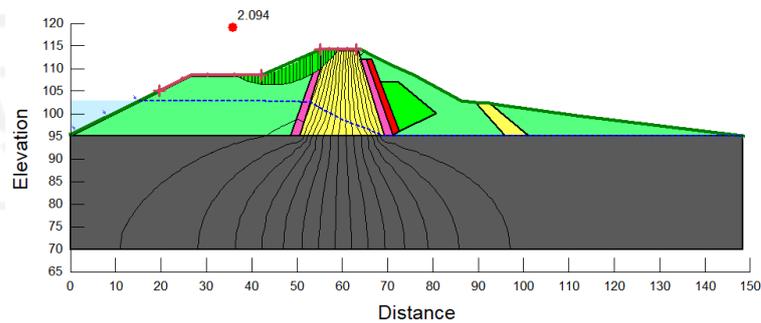
**Gambar 5. 20 Hasil Running Kondisi MAN Lereng Hilir Gempa OBE**



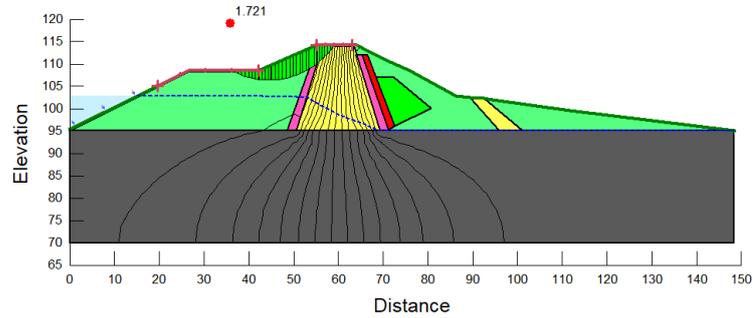
**Gambar 5. 21 Hasil Running Kondisi MAN Lereng Hilir Gempa MDE**

#### 5.4.3. Kondisi Muka Air Minimum

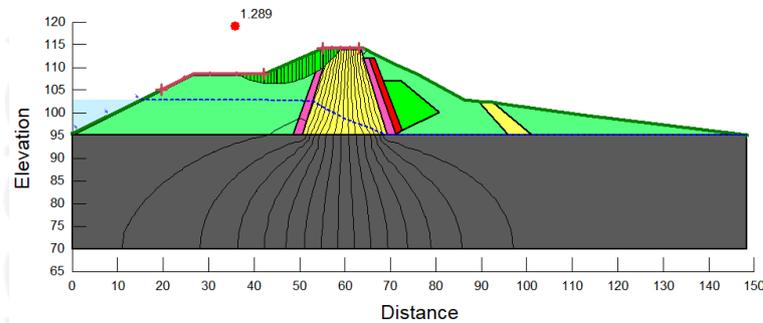
Berikut ini hasil analisis menggunakan SLOPE/W pada lereng hulu dan hilir dengan tinjauan tanpa gempa, gempa OBE dan gempa MDE sebagai berikut.



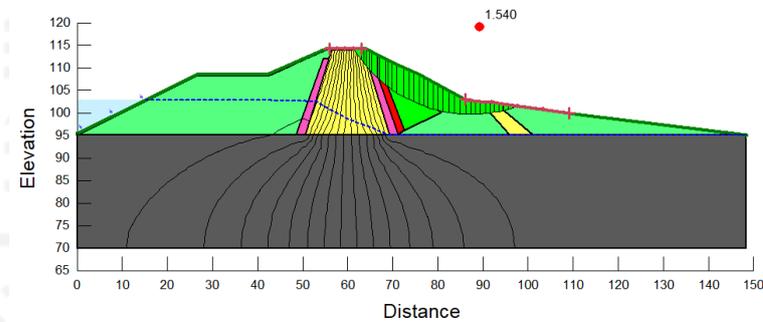
**Gambar 5. 22 Hasil Running Kondisi MAM Lereng Hulu Tanpa Gempa**



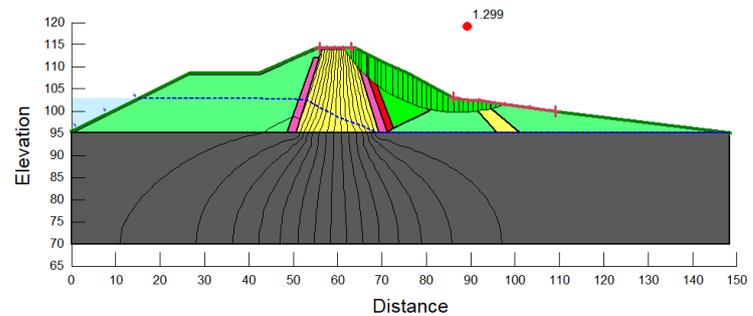
**Gambar 5. 23 Hasil Running Kondisi MAM Lereng Hulu Gempa OBE**



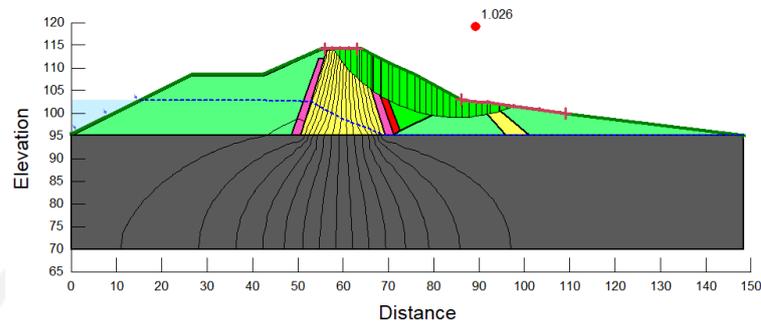
**Gambar 5. 24 Hasil Running Kondisi MAM Lereng Hulu Gempa MDE**



**Gambar 5. 25 Hasil Running Kondisi MAM Lereng Hilir Tanpa Gempa**



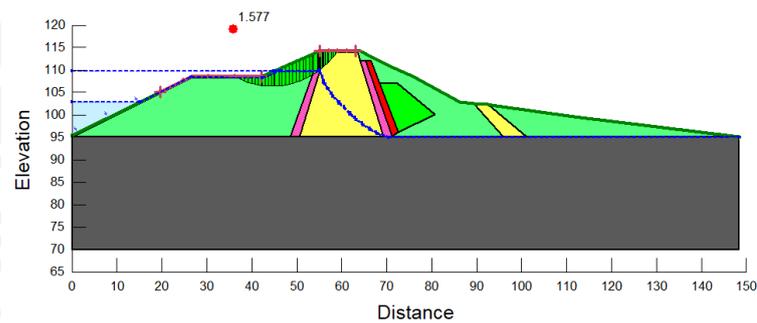
**Gambar 5. 26 Hasil Running Kondisi MAM Lereng Hilir Gempa OBE**



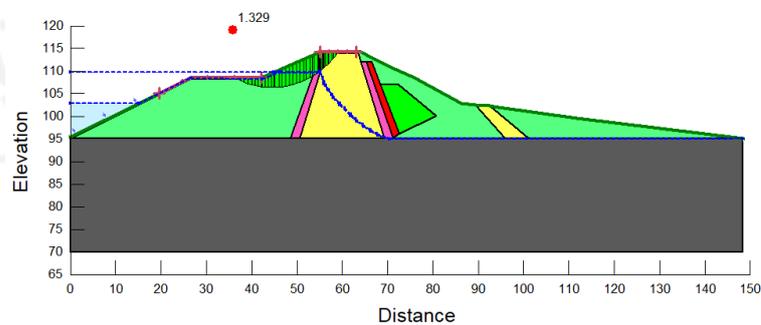
**Gambar 5. 27 Hasil Running Kondisi MAM Lereng Hilir Gempa MDE**

#### 5.4.4. Kondisi Surut Cepat

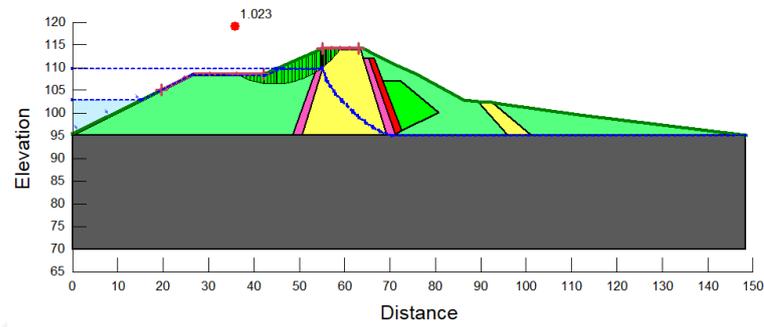
Berikut ini hasil analisis menggunakan SLOPE/W pada lereng hulu dan hilir dengan tinjauan tanpa gempa, gempa OBE dan gempa MDE sebagai berikut.



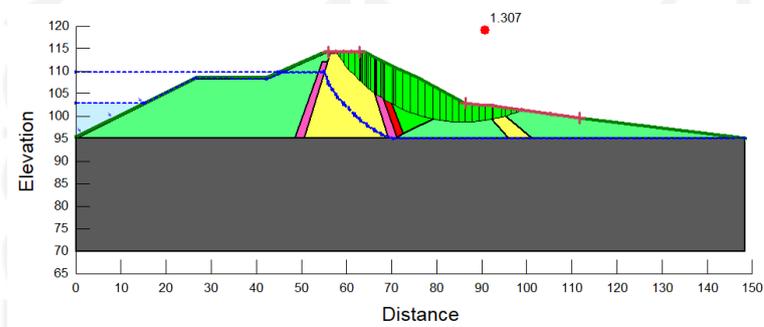
**Gambar 5. 28 Hasil Running Kondisi Surut Cepat Lereng Hulu Tanpa Gempa**



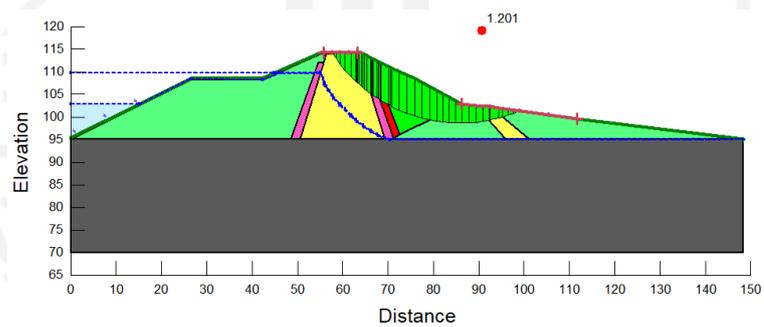
**Gambar 5. 29 Hasil Running Kondisi Surut Cepat Lereng Hulu Gempa OBE**



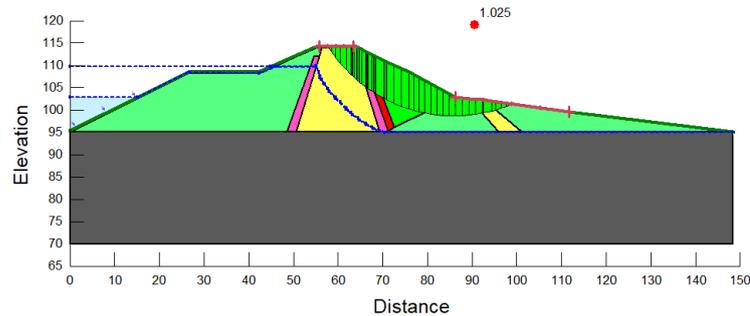
**Gambar 5. 30 Hasil Running Kondisi Surut Cepat Lereng Hulu Gempa MDE**



**Gambar 5. 31 Hasil Running Kondisi Surut Cepat Lereng Hilir Tanpa Gempa**



**Gambar 5. 32 Hasil Running Kondisi Surut Cepat Lereng Hilir Gempa OBE**



**Gambar 5. 33 Hasil Running Kondisi Surut Cepat Lereng Hilir Gempa MDE**

## 5.5. Pembahasan

### 5.5.1. Pembahasan Rembesan

Batas aman rembesan berdasarkan debitnnya 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 total rembesan dari waduk yang melewati pondasi dan badan bendungan tidak boleh lebih dari 1% rata-rata debit sungai yang masuk ke dalam waduk. Pada Bendungan Kedung Brubus debit inflownya sebesar  $41 \text{ m}^3/\text{s}$  sehingga nilai 1%nya sebesar  $0,41 \text{ m}^3/\text{s}$ . Panjang Bendungan Kedung Brubus 146 m. Kondisi keamanan bendungan berdasarkan debit rembesan dapat dilihat pada table 5.4 sebagai berikut.

**Tabel 5. 4 Pembahasan Keamanan Bendungan Terhadap Debit Rembesan**

NO	Kondisi	Debit Rembesan ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Syarat Debit Rembesan Maksimum ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Status
1	MAB	$1,11 \times 10^{-3}$	$4,10 \times 10^{-1}$	AMAN
2	MAN	$9,04 \times 10^{-4}$	$4,10 \times 10^{-1}$	AMAN
3	MAM	$5,58 \times 10^{-4}$	$4,10 \times 10^{-1}$	AMAN

Dari hasil analisis yang ditunjukkan pada tabel 5.4 didapatkan Bendungan Kedung Brubus aman terhadap debit rembesan pada kondisi muka air banjir, muka air normal dan muka air minimum.

Batas aman rembesan yang terjadi berdasarkan pemeriksaan piping dengan mempertimbangkan kecepatan rembesan yang terjadi. Syarat aman dari kecepatan rembesan yaitu kecepatan rembesan harus lebih kecil dari kecepatan kritis ( $V_s < V_c$ ). Bendungan Kedung Brubus kondisi keamanan rembesannya berdasarkan kecepatan rembesan dapat dilihat pada Tabel 5.5 sebagai berikut.

**Tabel 5. 5 Pembahasan Keamanan Bendungan Terhadap Kecepatan Rembesan**

NO	Kondisi	Kecepatan Rembesan ( $V_s$ ) ( $m^3/s$ )	Kecepatan Kritis ( $V_c$ ) ( $m^3/s$ )	Status
1	MAB	$6,36 \times 10^{-7}$	$5,1 \times 10^{-3}$	AMAN
2	MAN	$5,58 \times 10^{-7}$	$5,1 \times 10^{-3}$	AMAN
3	MAM	$3,40 \times 10^{-7}$	$5,1 \times 10^{-3}$	AMAN

Dari hasil analisis yang ditunjukkan pada Tabel 5.5 didapatkan Bendungan Kedung Brubus aman terhadap kecepatan rembesan pada kondisi muka air banjir, muka air normal dan muka air minimum.

Batas rembesan terhadap piping berdasarkan Harza (1935) dalam Hardiyatmo (2002) menyatakan bahwa nilai faktor keamanan bangunan air berupa perbandingan antara nilai gradien hidrolis kritis dengan gradien keluar maksimum harus lebih besar dari 3 sampai dengan 4 ( $\frac{i_c}{i_e} > 3$  s/d 4). Dari hasil perhitungan berikut ini status keamanan Bendungan Kedung Brubus terhadap Gradien hidrauliknya dapat dilihat pada Tabel 5.6.

**Tabel 5. 6 Pembahasan Keamanan Bendungan Terhadap Gradien Hidraulik**

No	Kondisi	I	Ic	SF	Syarat SF Minimum	Status
1	MAB	0,78	0,78	1,00	3	TIDAK AMAN
2	MAN	0,68	0,78	1,15	3	TIDAK AMAN
3	MAM	0,42	0,78	1,85	3	TIDAK AMAN

Dari hasil analisis yang ditunjukkan pada Tabel 5.6 didapatkan Bendungan Kedung Brubus tidak aman terhadap gradien hidraulik pada kondisi muka air banjir, muka air normal dan muka air minimum.

### 5.5.2. Pembahasan Stabilitas Lereng

Persyaratan faktor keamanan stabilitas bendungan mengikuti SNI 8064 : 2012 yang terdapat pada Tabel 3.1 dijelaskan bahwa pada aliran langgeng yang dipengaruhi rembesan pada tubuh bendungan kondisi tanpa gempa syarat minimum angka keamanan sebesar 1.5 , pada gempa OBE syarat minimum angka keamanan sebesar 1.2 dan pada kondisi gempa MDE syarat minimum angka keamanan sebesar sebesar 1. Pada kondisi darurat berupa surut cepat karena penggunaan air melebihi kebutuhan kondisi tanpa gempa syarat minimum angka keamanan sebesar 1.3 , pada gempa OBE syarat minimum angka keamanan sebesar 1.1 dan pada gempa MDE syarat minimum angka keamanan sebesar sebesar 1. Berikut ini status keamanan stabilitas lereng Bendungan Kedung Brubus dapat dilihat pada Tabel 5.7 sampai tabel 5.9.

**Tabel 5. 7 Pembahasan Keamanan Stabilitas Tubuh Bendungan Kedung Brubus Tanpa Gempa**

NO	Kondisi	Lereng	SF Tanpa Gempa	Syarat SF Minimum	Status
1	Muka air banjir	Hulu	1,823	1,5	AMAN
		Hilir	1,540	1,5	AMAN
2	Muka air normal	Hulu	1,929	1,5	AMAN
		Hilir	1,540	1,5	AMAN
3	Muka air minimum	Hulu	2,094	1,5	AMAN
		Hilir	1,540	1,5	AMAN
4	Surut Cepat	Hulu	1,577	1,3	AMAN
		Hilir	1,307	1,3	AMAN

**Tabel 5. 8 Pembahasan Keamanan Stabilitas Tubuh Bendungan Kedung Brubus Gempa OBE**

NO	Kondisi	Lereng	SF Gempa OBE	Syarat SF Minimum	Status
1	Muka air banjir	Hulu	1,477	1,2	AMAN
		Hilir	1,299	1,2	AMAN
2	Muka air normal	Hulu	1,583	1,2	AMAN
		Hilir	1,299	1,2	AMAN
3	Muka air minimum	Hulu	1,721	1,2	AMAN
		Hilir	1,299	1,2	AMAN
4	Surut Cepat	Hulu	1,329	1,1	AMAN
		Hilir	1,201	1,1	AMAN

**Tabel 5. 9 Pembahasan Keamanan Stabilitas Tubuh Bendungan Kedung Brubus Gempa MDE**

NO	Kondisi	Lereng	SF Gempa MDE	Syarat SF Minimum	Status
1	Muka air banjir	Hulu	1,083	1,00	AMAN
		Hilir	1,022	1,00	AMAN
2	Muka air normal	Hulu	1,183	1,00	AMAN
		Hilir	1,022	1,00	AMAN
3	Muka air minimum	Hulu	1,289	1,00	AMAN
		Hilir	1,022	1,00	AMAN
4	Surut Cepat	Hulu	1,023	1,00	AMAN
		Hilir	1,025	1,00	AMAN

Dari hasil yang diperoleh pada table 5.7 sampai 5.9 didapatkan bahwa pada semua kondisi muka air baik itu banjir, normal, minimum dan surut cepat serta dengan beban tanpa gempa, OBE dan MDE didapatkan semua dalam kondisi aman pada bagian hulu maupun hilir.

## **BAB VI**

### **PENUTUP**

#### **6.1. Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian dan melakukan evaluasi keamanan Bendungan Kedung Brubus dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Bendungan Kedung Brubus AMAN terhadap debit rembesan dengan analisis SEEP/W pada muka air banjir, kondisi muka air normal, dan kondisi muka air minimum. Semua kondisi muka air tersebut dalam keadaan aman karena memenuhi syarat mengikuti pedoman Grouting Untuk Bendungan Departemen Pekerjaan Umum-SDA yang mengacu pada Batasan yang berlaku di Jepang (*Japanese Institute of Irrigation and Drainage 1988*) dimana 1% dari debit inflownya sebesar  $0,41 \text{ m}^3/\text{s}$ .
2. Bendungan Kedung Brubus TIDAK AMAN terhadap piping dengan syarat SF 3 s/d 4 disemua kondisi muka air karena SF yang didapatkan  $< 3$ .
3. Faktor Keamanan (SF) Bendungan Kedung Brubus dalam kondisi AMAN dengan keadaan tanpa beban gempa di bagian hulu dan hilir dalam kondisi muka air banjir, muka air normal, muka air minimum dan surut cepat.
4. Faktor Keamanan (SF) Bendungan Kedung Brubus dalam kondisi AMAN dalam kondisi diberi beban gempa OBE dan MDE dibagian hulu dan hilir dalam kondisi muka air banjir, muka air normal, muka air minimum dan surut cepat.

## 6.2. Saran

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

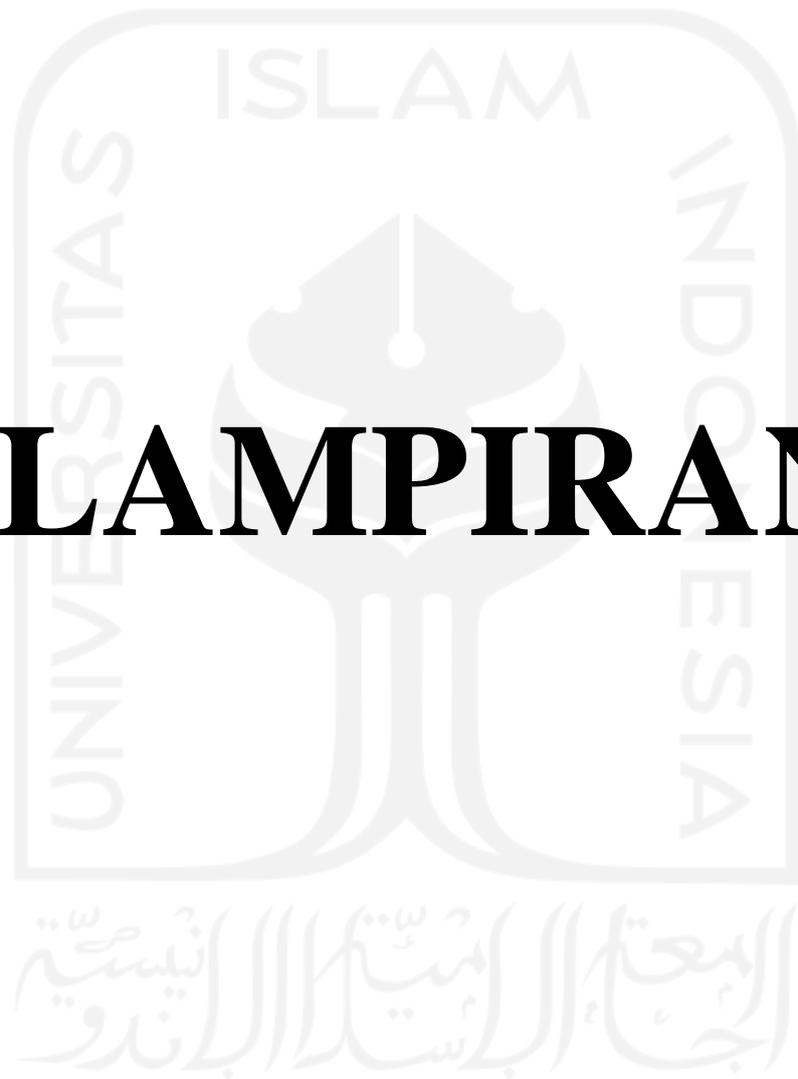
1. Perlu dilakukan analisis stabilitas dengan menggunakan data pembacaan piezometer di lapangan
2. Pada penelitian selanjutnya perlu melakukan analisis menggunakan *software* lainnya seperti PLAXIS, GEO/G dan lainnya sebagai perbandingan.
3. Penelitian selanjutnya perlu dilakukan perbandingan antara analisis secara manual untuk debit rembesan dan juga stabilitas bendungan nya.



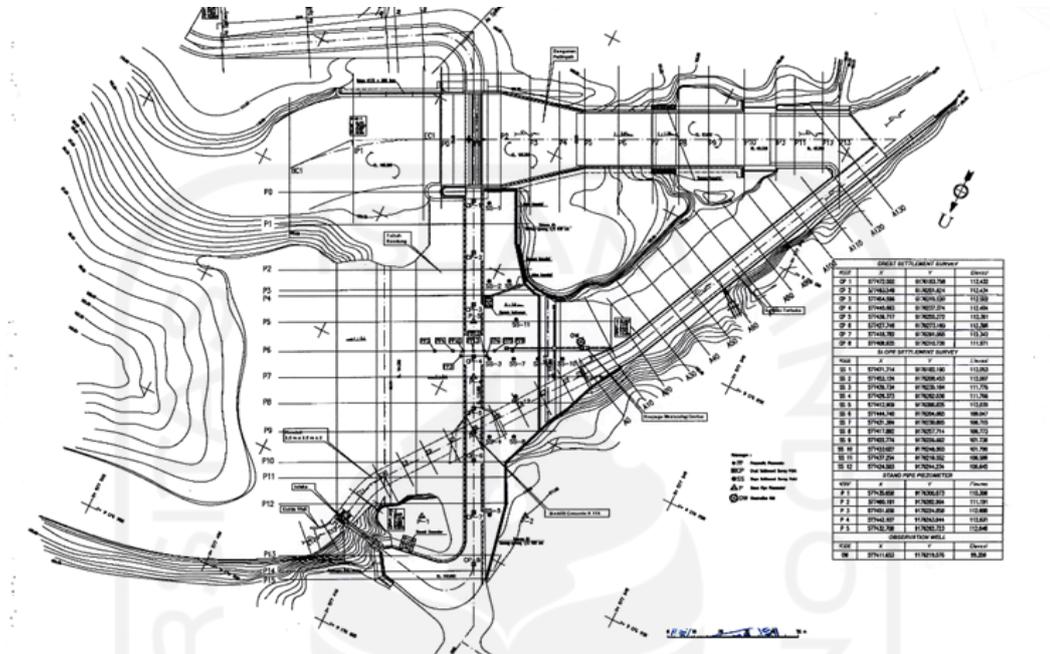
## DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standarisasi Nasional (2016). Standar Nasional Indonesia (SNI) 8064 : 2016. *Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Urugan*. Jakarta.
- Bowles, Joseph E. 1991. *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)*. Erlangga: Jakarta.
- Das, B. M. (1988). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Jakarta: Erlangga.
- Das, Braja M. (1995). *Mekanika Tanah 1*. Erlangga. Jakarta.
- Departemen Pekerjaan Umum Nomor 27 Tahun 2008 Tentang Analisis Dinamik Bendungan Urugan. Jakarta. Badan Penerbit Pekerjaan Umum.
- Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah (2004). *Pedoman Konstruksi Dan Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan (Pd T-14-2004-A)*. Jakarta : Badan Penerbit Pekerjaan Umum.
- Handayani, T. (2014). PENGARUH MUKA AIR TANAH TERHADAP KESTABILAN LERENG MENGGUNAKAN GEOSLOPE/2 7.12. Depok : Universitas Gunadarma
- Hardiyatmo, H. C. (1996). *Teknik Pondasi I*, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. (2010). *Analisis dan Perancangan Fondasi I*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. (2018). *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Mohammed, A. B. (2019). *Seepage Analysis of Kiri Dam Using Finite Elements Method*. Bauchi : Abubakar Tafawa Balewa Univerity.
- Nanda, T. N. (2016). Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Bajulmati dengan Metode Elemen Hingga Model 2D dan 3D. Bandung : Institut Teknologi Bandung
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2010 Tentang Bendungan.
- Rahman, H. K. (2014). PENGARUH FLUKTUASI MUKA AIR WADUK TERHADAP DEBIT REMBESAN MENGGUNAKAN MODEL SEEP/W (Studi Kasus di Bendungan Benel, Kabupaten Jembrana, Bali). Surakarta : Universitas Sebelas Maret
- Sosrodarsono, S., & Takeda , K. (1981). *Bendungan Type Urugan*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Sukirman (2014). ANALISIS REMBESAN PADA BENDUNG TIPE URUGAN MELALUI UJI HIDROLIK DI LABORATORIUM HIDRO FT UNSRI. Bukit Besar Palembang : Universitas Sriwijaya
- Terzaghi, K. (1987). *Mekanika Tanah Dalam Praktek Rekayasa*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Wesley, L. D. (1973). *Mekanika Tanah*. Jakarta: Badan Penerbit Pekerjaan Umum.

# LAMPIRAN



## Lampiran 1 Kondisi Bendungan Kedung Brubus



L-1. 1 Denah Penempatan Instrumentasi



L-1. 2 Kondisi Lereng Hulu



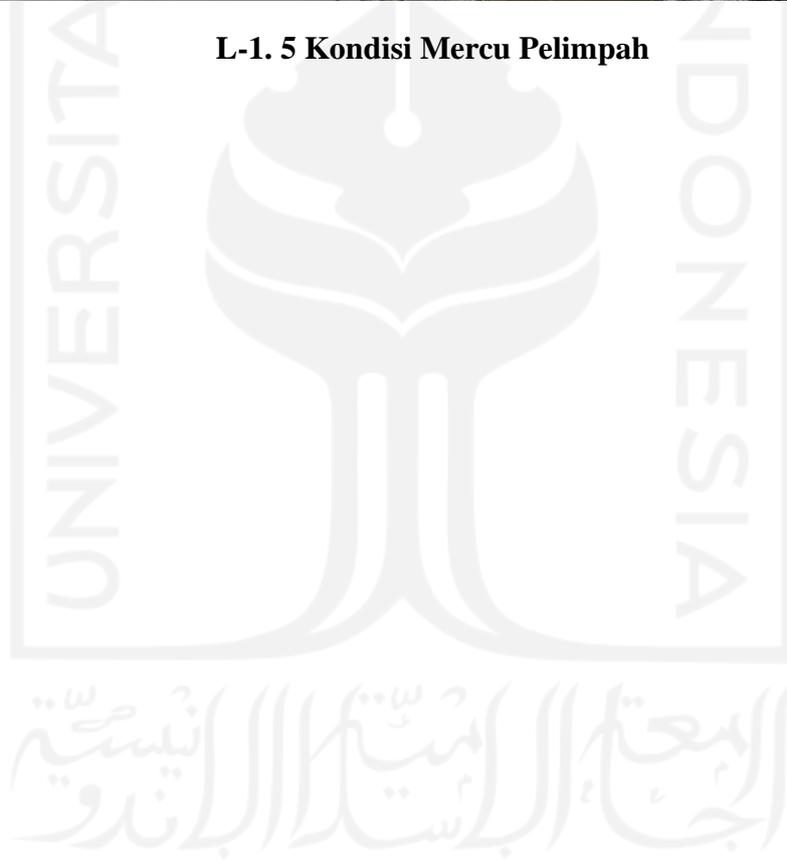
**L-1. 3 Kondisi Lereng Hilir**

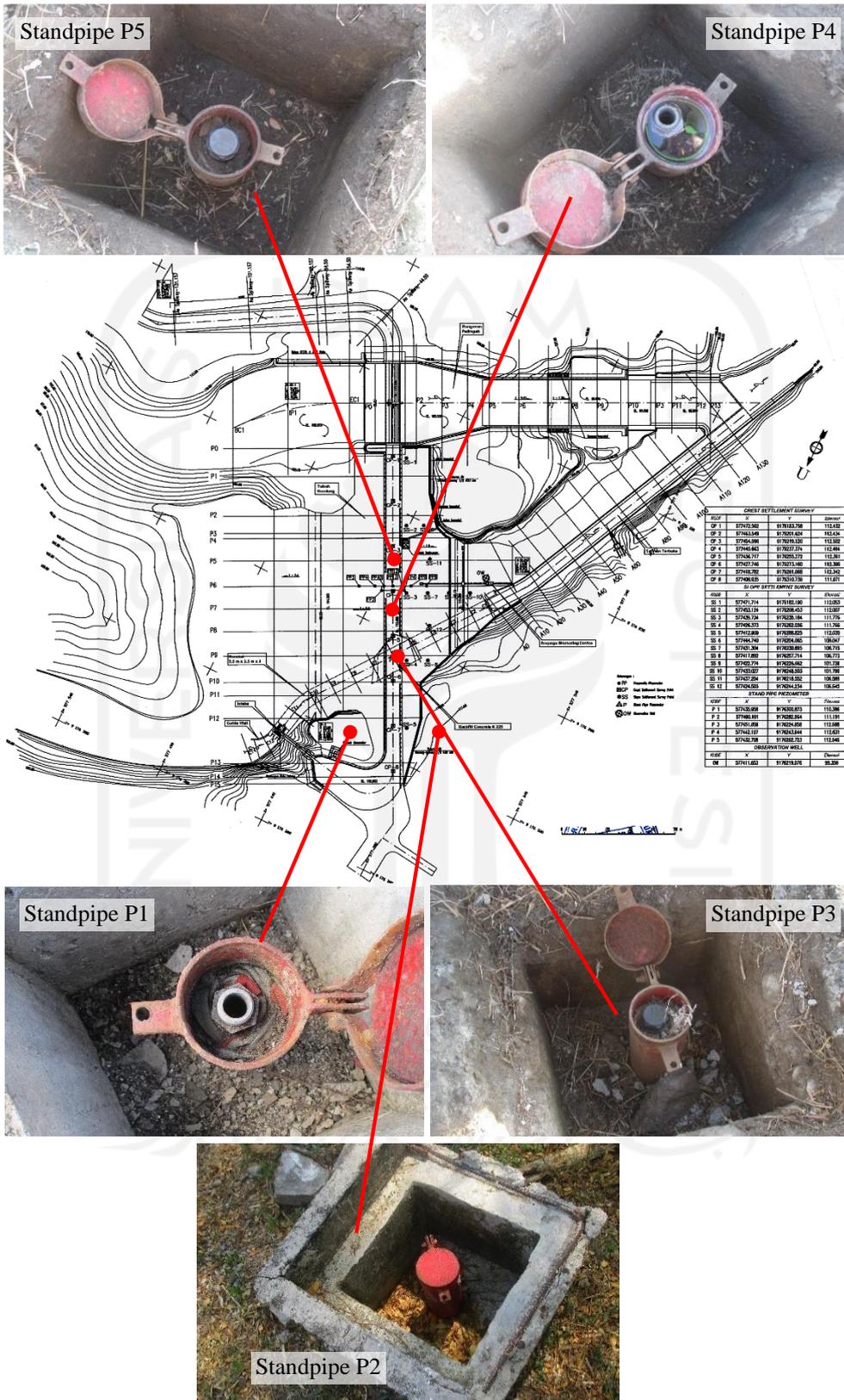


**L-1. 4 Kondisi Puncak Cofferdam Hilir**



### L-1. 5 Kondisi Mercu Pelimpah





L-1. 6 Kondisi Psiometer *Standpipe* Berdasarkan Posisi Perletakan

**Lampiran 2. 1 Perbandingan Analisis Debit Banjir**

No	Kala Ulang  (tahun)	Debit Banjir (m <sup>3</sup> /detik)		
		Desain (2004) Sta. Sumberbendo	Inspeksi Besar(2015) Sta. Notopuro	DOISP (2020) Kombinasi TRMM & Sta. Kd Brubus
		<i>Nakayasu</i>	<i>Gama 1</i>	<i>Gama 1</i>
1	2	98,83		122,55
2	5	120,60		148,13
3	10	139,53		160,41
4	20	156,06		171,66
5	25	165,03		
6	50	182,69		183,94
7	100	199,71		192,12
8	200	228,64		199,29
9	1000	240,20	325,13	214,63
10	1000 isohyet		457,61	
11	½PMF hersfield	297,62		
12	½PMF isohyet	389,47		324,34
13	PMF hersfield	600,09	553,18	
14	PMF isohyet	783,79	776,72	638,69

**Lampiran 2. 2 Perbandingan Hasil Penelusuran Banjir Kapasitas Pelimpah Berbagai Studi**

Q	No	Parameter	Satuan	Perbandingan Hasil Analisis		
				Desain(2004)	Inspeksi Besar(2015)	DOISP(2020)
Q1000	1	Debit puncak <i>inflow</i>	m <sup>3</sup> /dt	240,20	457,61	214,63
	2	Debit puncak <i>outflow</i>	m <sup>3</sup> /dt	193,92	412,30	203,97
	3	Elevasi mercu pelimpah	m	108,00	108,00	109,90
	4	Elevasi banjir	m	109,81	111,00	111,87
	5	Elevasi puncak	m	112,60	112,60	114,40
	6	Tinggi jagaan	m	2,790	1,599	2,53
Q ½ PMF	1	Debit puncak <i>inflow</i>	m <sup>3</sup> /dt			306,23
	2	Debit puncak <i>outflow</i>	m <sup>3</sup> /dt			311,50
	3	Elevasi mercu pelimpah	m			109,90
	4	Elevasi banjir	m			112,51
	5	Elevasi puncak	m			114,40
	6	Tinggi jagaan	m			1,890
QPMF	1	Debit puncak <i>inflow</i>	m <sup>3</sup> /dt	783,79	776,72	638,76
	2	Debit puncak <i>outflow</i>	m <sup>3</sup> /dt			616,83
	3	Elevasi mercu pelimpah	m	108,00	108,00	109,90
	4	Elevasi banjir	m	110,85	112,21	114,02
	5	Elevasi puncak	m	112,60	112,60	114,40
	6	Tinggi jagaan	m	1,750	0,390	0,380