

**ANALISIS STABILITAS BENDUNG SAAT KONDISI  
NORMAL DAN BANJIR PADA PROYEK PEMBANGUNAN  
BENDUNG SEI PADANG D.I. BAJAYU TEBING TINGGI  
SUMATERA UTARA**

**SKRIPSI**

Diajukan Untuk Memenuhi syarat Dalam  
Ujian Sidang Sarjana Teknik Sipil Strata Satu  
Universitas Medan Area

**Disusun Oleh:**

**RICI RIKARDO SITINJAK  
168110095**



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MEDAN AREA  
MEDAN  
2023**

**UNIVERSITAS MEDAN AREA**

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Document Accepted 4/12/23

Access From (repository.uma.ac.id)4/12/23

**LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**

**ANALISIS STABILITAS BENDUNG SAAT KONDISI  
NORMAL DAN BANJIR PADA PROYEK PEMBANGUNAN  
BENDUNG SEI PADANG D.I. BAJAYU TEBING TINGGI  
SUMATERA UTARA**

**SKRIPSI**

Diajukan Untuk Memenuhi syarat Dalam  
Ujian Sidang Sarjana Teknik Sipil Strata Satu  
Universitas Medan Area

Disusun Oleh

**RICI RIKARDO SITINJAK**  
168110095

Disetujui:

Pembimbing I

  
Hermansyah, ST, MT.  
NIDN: 0106088004

Pembimbing II

  
Ir. Suranto, ST, MT.  
NIDN: 0129127605

Mengetahui:

Dekan Fakultas Teknik  
  
Hermansyah, S. Kom, M. Kom.  
NIDN: 0106088004

Ketua Prodi Studi Teknik Sipil  
  
Hermansyah, ST, MT.  
NIDN: 0106088004

## HALAMAN PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rici Rikardo Sitingjak

NPM : 168110095

Judul : Analisis Stabilitas Bendung Saat Kondisi Normal dan Banjir Pada Proyek  
Pembangunan Bendung Sei Padang D.I. Bajayu Tebing Tinggi Sumatera  
Utara

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa Skripsi ini merupakan karya saya sendiri. Apabila terdapat karya orang lain yang saya kutip, maka saya akan mencantumkan sumber secara jelas. Jika dikemudian hari ditemukan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi dengan aturan yang berlaku. Demikian pernyataan ini saya buat tanpa ada paksaan dari pihak mana pun.

Medan, Mei 2022

Yang membuat pernyataan



Rici Rikardo Sitingjak

## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

---

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Medan Area, saya yang bertanda tangan dibawah ini  
:

Nama : Rici Rikardo Sitinjak  
NPM : 168110095  
Program Studi : Teknik Sipil  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area **Hak Bebas Royalti Noneklusif (Non Exclusive Royalty Free-Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul : Redesain Struktur Gedung Fakultas Teknik Universitas Medan Area Menggunakan Metode Flat Slab. Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.  
Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Medan  
Pada tanggal : Mei 2023  
Yang menyatakan

(Rici Rikardo Sitinjak)

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan karunia-Nya. Laporan skripsi dengan judul “Analisis Stabilitas Bendung Saat Kondisi Normal dan Banjir Pada Proyek Pembangunan Bendung Sei Padang D.I. Bajayu Tebing Tinggi Sumatera Utara” dapat diselesaikan dengan baik dan sesuai dengan waktu yang telah ditentukan.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Medan Area. Penelitian ini bertujuan untuk Mengetahui Stabilitas Bendung terhadap gaya geser, guling dan Daya Dukung Tanah.

Selama penyusunan skripsi ini, banyak rintangan yang penulis dapatkan, tetapi berkat bantuan, bimbingan, dan dorongan dari berbagai pihak akhirnya dapat terselesaikan dengan baik. Melalui kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih atas kerja sama dan dukungan dari berbagai pihak selama proses penelitian hingga penyusunan skripsi ini kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Dadan Ramdan, M.Eng, M.Sc, Selaku Rektor Universitas Medan Area.
2. Bapak Dr. Rahmad Syah, S. Kom, M. Kom, Selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil Universitas Medan Area.
3. Bapak Hermansyah, ST, MT, Selaku Ketua Prodi Teknik Sipil Universitas Medan Area dan Selaku Dosen Pembimbing I yang telah mengarahkan dan memberikan solusi dalam pembuatan skripsi.
4. Bapak Ir. Suranto, ST, MT. Selaku Dosen Pembimbing II yang telah

mengarahkan dan memberikan solusi dalam pembuatan skripsi.



5. Kedua orangtua tercinta dan keluarga yang telah memberikan dukungan dan doa tak terhingga sejak awal masuk Universitas hingga saat proses penulisan skripsi.
6. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebut satu persatu yang telah membantu dalam penyelesaian penulisan skripsi ini.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dan memperlancar dalam penulisan skripsi ini. Penulis berharap skripsi ini bisa memberikan banyak manfaat untuk dunia penelitian terutama dalam bidang Teknik Sipil.

Medan, .....2022

Hormat Saya



Rici Rikardo Sitinjak

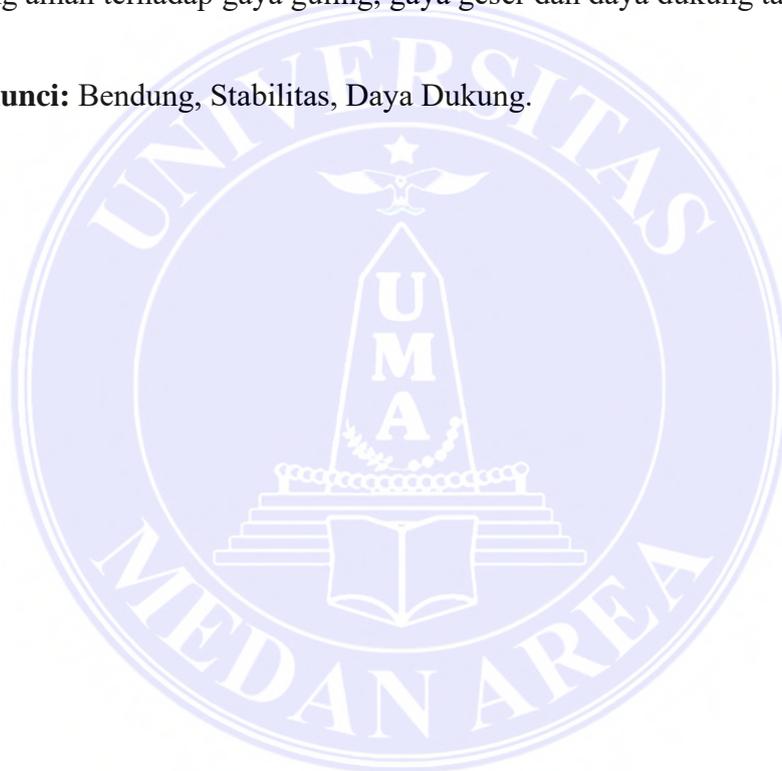
168110095



## ABSTRAK

Bendung Sei Padang D.I. Bajayu terletak di daerah aliran sungai (DAS) Padang Tebing Tinggi Sumatera Utara yang direncanakan untuk kebutuhan pertanian masyarakat setempat. Bendung Sei Padang D.I. Bajayu direncanakan dengan struktur yang tahan terhadap gaya geser, gaya guling dan stabilitas daya dukung tanah baik dalam kondisi normal dan banjir agar bangunan bendung tetap aman saat kondisi banjir dan normal. Dari hasil perhitungan analisis diperoleh faktor keamanan pada saat normal gaya guling adalah 1,73, faktor keamanan gaya geser adalah 2,54 dan pada saat banjir gaya guling adalah 1,42 dan faktor keamanan gaya geser adalah 2,80 serta daya dukung tanah saat kondisi banjir dan normal 41,20. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut maka dapat ditarik kesimpulan bahwa bendung aman terhadap gaya guling, gaya geser dan daya dukung tanah.

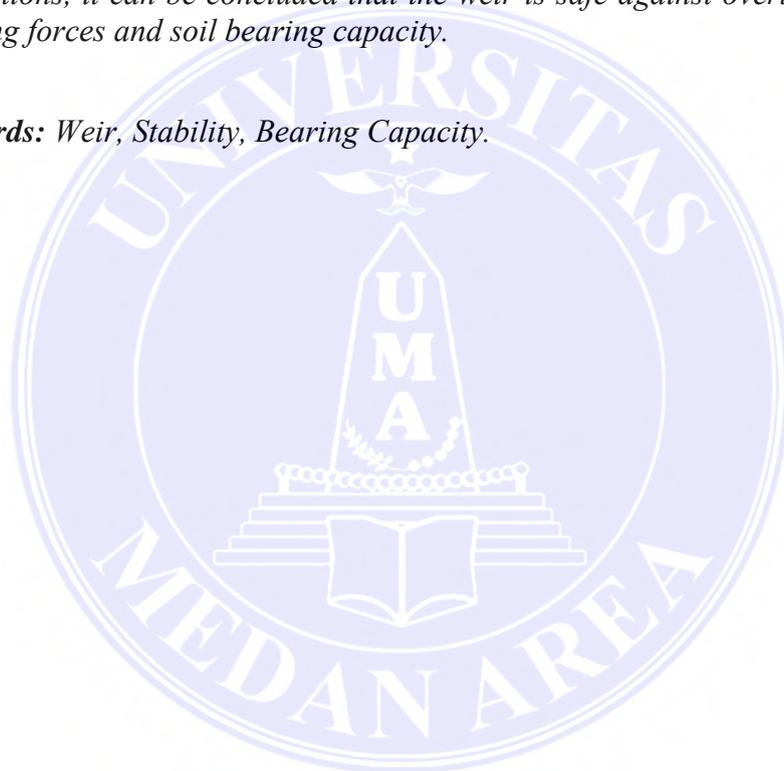
**Kata kunci:** Bendung, Stabilitas, Daya Dukung.



## ABSTRACT

*Dam Sei Padang D.I. Bajayu is located in the Padang Tebing Tinggi river basin (DAS) of North Sumatra which is planned for the agricultural needs of the local community. Dam Sei Padang D.I. Bajayu is planned with a structure that is resistant to shear forces, overturning forces and soil carrying capacity stability both under normal and flood conditions so that the weir remains safe during flood and normal conditions. From the results of the analysis calculation, it is obtained that the factor of safety at normal times of overturning force is 1.73, the factor of safety for shear force is 2.54 and during floods the overturning force is 1.42 and the factor of safety for shear force is 2.80 as well as the carrying capacity of the soil when the conditions flooding and normal 41.20. Based on the results of these calculations, it can be concluded that the weir is safe against overturning forces, shearing forces and soil bearing capacity.*

**Keywords:** *Weir, Stability, Bearing Capacity.*



## DAFTAR ISI

### LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

### HALAMAN PERNYATAAN

<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xx</b>
<b>DAFTAR NOTASI.....</b>	<b>xi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1. 1 Latar Belakang.....	1
1. 2 Maksud dan Tujuan Penelitian .....	2
1. 2. 1 Maksud Penelitian.....	2
1. 2. 2 Tujuan Penelitian .....	2
1. 3 Rumusan Masalah.....	2
1. 4 Manfaat Penelitian .....	2
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>3</b>
2. 1 Penelitian Terdahulu .....	3
2. 2 Pengertian Bendung.....	5
2. 3 Analisis Stabilitas .....	6
2. 3. 1 Gaya-gaya yang Bekerja.....	7
2. 3. 2 Gaya Tekan Air.....	7
2. 3. 3 Tekanan Lumpur.....	12

2. 3. 4 Gaya gempa .....	13
2. 3. 5 Berat Bangunan.....	15
2. 3. 6 Reaksi Pada Pondasi .....	16
2.4 Kebutuhan Indikator Stabilitas.....	18
2. 4. 1 Stabilitas Terhadap Gelincir .....	18
2. 4. 2 Ketahanan Bendung Terhadap Guling.....	20
2. 4. 3 Katahanan Terhadap <i>Piping</i> .....	22
2. 5 Tekanan Air .....	27
2. 5. 1 Tekanan Hidrostatik.....	30
2. 5. 2 Tekanan Hidrodinamik .....	32
2. 6 Beban Gempa.....	33
2. 7 Kombinasi Pembebanan .....	35
2. 8 Tegangan Izin dan Faktor Keamanan .....	35
2. 8. 1 Tegangan Izin .....	35
2. 8. 2 Faktor keamanan.....	36
2. 9 Cara Pengendalian Rembesan.....	37
2. 9. 1 Pola Kegagalan Akibat Rembesan.....	38
2. 9. 2 Tekanan Angkat ( <i>Blow Out</i> ).....	38
2. 9. 3 <i>Piping</i> (Erosi Buluh).....	39
2. 9. 2 Tekanan Angkat ( <i>Blow Out</i> ).....	38
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>42</b>
3. 1 Lokasi Penelitian.....	42
3. 2 Gambaran Kondisi Eksisting .....	43
3. 3 Detail Pekerjaan Bendung .....	45

3. 4 Data Penelitian .....	46
3. 4. 1 Data Primer .....	46
3. 4. 2 Data Sekunder .....	47
3. 5 Metode Penelitian .....	48
3. 6 Diagram Alir Penelitian .....	49
<b>BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>50</b>
4. 1 Hasil dan Perhitungan Stabilitas pada Kondisi Normal.....	50
4. 1. 1 Keamanan Terhadap Guling (Kondisi Normal).....	50
4. 1. 2 Keamanan terhadap Gelincir .....	51
4. 2 Gaya Luar yang Bekerja (Pada Kondisi Banjir) .....	52
4. 2. 1 Tekanan Air .....	52
4. 2. 2 Tekanan Lumpur.....	53
4. 2. 3 Gaya Angkat/ <i>Uplift</i> .....	53
4. 2. 4 Gaya Gempa .....	55
4. 3 Stabilitas Bendung (Kondisi Banjir).....	55
4. 3. 1 Faktor Keamanan Terhadap Guling (Kondisi Banjir) .....	56
4. 3. 2 Faktor Keamanan Terhadap Gelincir.....	56
4. 4 Stabilitas Terhadap <i>Piping</i> .....	57
4. 5 Stabilitas Terhadap Daya Dukung Tanah .....	62
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>65</b>
5. 1 Simpulan .....	65
5. 2 Saran .....	65
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>66</b>
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Gaya angkat pada pondasi .....	8
Gambar 2. 2	Penggunaan analog listrik.....	9
Gambar 2. 3	Contoh jaringan aliran .....	10
Gambar 2. 4	Gaya angkat pada pondasi .....	11
Gambar 2. 5	Distribusi tekanan pada pondasi .....	16
Gambar 2. 6	Tebal lantai kolam olak .....	22
Gambar 2. 7	Metode angka rembesan Lane .....	24
Gambar 2. 8	Sketsa parameter stabilitas.....	26
Gambar 2. 9	Aliran Air Melalui Pori-Pori Tanah .....	27
Gambar 2. 10	Tekanan air pada dinding tegak.....	31
Gambar 2. 11	Gaya tekan air ke atas .....	32
Gambar 2. 12	Tekanan hidrodinamik.....	32
Gambar 3. 1	Lokasi Penelitian .....	42
Gambar 3. 2	Lokasi cakupan bendung .....	43
Gambar 3. 3	Site Plan Pekerjaan .....	43
Gambar 3. 4	Kondisi Eksisting.....	44
Gambar 3. 5	Detail Pekerjaan Mercu Bendung.....	46
Gambar 3. 6	Detail Pekerjaan Mercu Bendung.....	46
Gambar 3. 7	Kerangka berpikir .....	49

Gambar 4. 1	Gaya Hidrostatik pada Kondisi Banjir.....	52
Gambar 4. 2	Gaya <i>uplift</i> pada kondisi banjir.....	54
Gambar 4. 3	Panjang Rembesan Tanpa <i>Sheet Pile</i> .....	57
Gambar 4. 4	Panjang rembesan menggunakan <i>sheet pile</i> .....	61



## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Nilai proporsi tekanan.....	8
Tabel 2. 2	Koefisien jenis tanah .....	14
Tabel 2. 3	Periode ulang dan percepatan dasar gempa .....	15
Tabel 2. 4	Volume bangunan.....	15
Tabel 2. 5	Harga perkiraan koefisien gesekan .....	19
Tabel 2. 6	Nilai daya dukung izin.....	21
Tabel 2. 7	Nilai angka rembesan Lane .....	25
Tabel 2. 8	Koefisien zona gempa .....	34
Tabel 2. 9	Kombinasi Pembebanan.....	35
Tabel 2. 10	faktor keamanan terhadap guling .....	36
Tabel 2. 11	Faktor keamanan terhadap gelincir .....	37
Tabel 4. 1	Gaya dan Momen Kondisi Normal.....	50
Tabel 4. 2	Gaya dan Momen yang Bekerja Akibat Tekanan.....	53
Tabel 4. 3	Gaya dan momen akibat uplift pada kondisi banjir.....	55
Tabel 4. 4	Gaya dan Momen (Kondisi Banjir) .....	56
Tabel 4. 5	Angka Minimum Rembesan Lane.....	57
Tabel 4. 6	Panjang rembesan tanpa <i>sheet pile</i> .....	58
Tabel 4. 7	Perhitungan panjang rembesan dengan <i>sheet pile</i> .....	60
Tabel 4. 8	Perhitungan Eksentrisitas .....	63
Tabel 4. 9	Kekuatan Tekan Lapisan Bawah Pondasi .....	63
Tabel 4. 10	Parameter Daya Dukung Pondasi.....	64
Tabel 4. 11	Daya Dukung Pondasi .....	64

## DAFTAR NOTASI

$C$	: fraksi luas tekanan hidrostatik
$\tau_w$	: berat jenis air
$h_{\bar{z}}$	: tinggi air dihilir
$\xi$	: proporsi tekanan
$h$	: tinggi air dihulu
$A$	: luas area
$W_u$	: tekanan keatas resultanta
$P_x$	: gaya angkat dititik x
$L$	: panjang total zona kontak bendung dengan bagian tanah bawah,
$mL_x$	: jarak dari hulu sampai x sepanjang bidang kontak
$\Delta H$	: kenaikan tinggi energi
$H_x$	: tinggi energi di hulu bendung
$P_s$	: gaya yang bekerja secara horizontal pada 2/3 kedalaman dari bagian atas lumpur
$t_s$	: berat lumpur pada bendung
$h$	: ketinggian lumpur
$F$	: sudut gesekan internal
$r_s'$	: berat volume kering tanah pada bendung
$\lambda$	: berat volume butiran tanah
$a_d$	: percepatan gempa
$n, m$	: koefisien jenis tanah
$a_c$	: percepatan kejut

- E : koefisien gempa,
- g : percepatan gravitasi
- z : faktor terhadap letak geografis.
- P : Tekanan pada vertikal pondasi
- $\Sigma(W)$  : Total gaya vertikal yang bekerja,
- A : luas bagiandasar
- e : eksentritas beban /jarak pusat gravitasi dasar  
ketitik perpotong resultan dan dasar pondasi
- I : momen inersia dasar terhadap pusat gravitasi
- m : jarak (dari pusat alas ketitik tekan yang diinginkan)
- $\Sigma(H)$  : Total gaya horizontal
- $\theta$  : sudut resultan gaya, terhadap garis vertikal
- f : koefisien terhadap gesek
- S : faktor keamanan yang digunakan
- C : Kekuatan geser bahan
- A : Luas dasar
- $d_x$  : tebal lantai dititik x
- $P_x$  : gaya angkat dititik x
- $W_x$  : kedalaman air dititik x
- $\gamma$  : berat jenis bahan yang digunakan
- S : nilai faktor keamanan yang digunakan



## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Air merupakan zat yang penting untuk umat manusia. Manfaat air salah satunya adalah untuk pengairan sawah/pertanian. Namun, jumlah curah hujan yang berfluktuasi dari bulan kebulan mengakibatkan pasokan air untuk lahan pertanian tidak mencukupi. Sebab itu, diperlukan bangunan air yang dapat mengairi sawah dan lahan pertanian sepanjang tahun dalam memenuhi ketersediaan air pada lahan pertanian. Salah satu bangunan air yang paling efektif untuk lahan persawahan dan pertanian adalah bendungan.

Bendungan adalah konstruksi bangunan melintang sungai yang dipergunakan untuk menaikkan permukaan sungai untuk irigasi dan kebutuhan air baku. Selama pembangunannya, bendung sering mengalami kerusakan atau ketidakstabilan, yang dapat mempengaruhi produksi pertanian. Persyaratan stabilitas harus dipenuhi dalam rangka pembangunan bendung, yang merupakan salah satu persyaratan utama untuk memastikan kapasitas dan umur bendung untuk menaikkan muka air yang mengalir ke lahan pertanian. Demikian pula dengan Bendung Bajayu D.I. Sei Padang yang mencakup D.I. Bajayu, D.I. Langau dan D.I. Paya lombang, dengan luas area 7.558 hektar. Bendung Bajayu diharapkan dapat mencukupi ketersediaan air untuk pertanian dan pengendalian banjir. Oleh karena itu, penulis melakukan analisis terhadap Bendung Bajayu untuk lebih memahami bendung tersebut dan penelitian lebih lanjut mengenai topic tersebut. Judul penelitian ini adalah “Analisis Stabilitas Bendung Pada Kondisi Normal dan Banjir Pada Proyek Pembangunan Bendung Sei Padang D.I. Bajayu Tebing Tinggi Sumatera Utara”.

## 1.2 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari penelitian adalah untuk menganalisis keamanan pada bendung D.I Bajayu terhadap gaya guling, gaya geser/gelincir dan stabilitas daya dukung tanah. Tujuannya adalah untuk memastikan keamanan struktur bendung pada saat kondisi normal dan banjir.

## 1.3 Perumusan Masalah

Dengan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya maka didapat rumusan masalahnya yakni bagaimana menganalisis nilai keamanan terhadap gaya geser, gaya guling dan daya dukung tanah dalam kondisi Normal dan kondisi Banjir pada Bendung D.I. Bajayu.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini untuk memberikan pemahaman penulis mengenai analisis stabilitas bendung dan sebagai bahan referensi bagi mahasiswa yang akan melakukan penelitian sejenis.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Terdahulu

Salah satu referensi/sumber dan acuan bagi penulis untuk melakukan penulisan dan perhitungan pada penelitian yaitu penelitian terdahulu, sehingga penulis mendapatkan dasar pemikiran dan memperkaya bahasan yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian yang dilakukan. Penelitian yang sudah pernah dilakukan sejenis dengan judul yang dibahas telah dilakukan sebelumnya, dikarenakan penelitian terdahulu sangat penting dicantumkan dalam sebuah penelitian yang akan dilakukan guna mengembangkan kajian yang akan dibahas. Berikut penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya yang menjadi referensi bagi penelitian skripsi ini yaitu:

1. Penelitian yang pernah dilakukan oleh Firnanda, A., dkk. (2016) mengenai Analisis Stabilitas Bendung (Studi Kasus: Bendung Tamiang). Dalam penelitiannya dilakukan untuk mengetahui Faktor *Safety* bendung terhadap geser dan guling. Dari Penelitian tersebut didapat hasil Faktor *Safety* terhadap geser sebesar  $2,35 > 1,5$  minimum yang disyaratkan. Faktor *Safety* terhadap guling yaitu  $3,33 > 1,5$  dari syarat minimum. Maka dapat disimpulkan bendung stabil yang ditinjau dari hasil perhitungan Faktor *Safety* terhadap geser dan guling.
2. Penelitian sejenis yang dilakukan oleh Pinandito, G. & Harsanto, P. (2021) mengenai Analisis Stabilitas Bendung Kamijoro. Dalam penelitian tersebut dilakukan untuk mengetahui Faktor *Safety* bendung terhadap geser dan guling. Dari analisis didapat hasil dari tangen resultan gaya yaitu  $0.14, <$  koefisien gesekan tanah dibagi oleh nilai faktor aman sebesar  $0.2$  dan untuk kontrol stabilitas terhadap guling didapatkan hasil  $2.3$  dan  $1.69$ , nilai  $>$  faktor aman yaitu  $1.26$  dan  $0.725$ . Sedangkan untuk *safety factor*

terhadap nilai *pipping* untuk kondisi banjir sebesar 134.13 dan untuk kondisi normal sebesar  $7.93 <$  persyaratan aman terhadap *pipping* dengan nilai aman rembesan Lane pada tanah pasir kasar sebesar 5,0. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa Bendung aman terhadap gelincir, guling dan piping.

3. Penelitian ini dilakukan oleh Fatmawati, L. E. & Utomo, A. C., (2019) tentang analisis stabilitas bendung Embung Made, Jombang. Penelitiannya dilaksanakan untuk mengetahui gaya-gaya dan beban yang bekerja pada embung, daya dukung tanah dan nilai factor keamanan stabilitas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa gaya dan beban yang bekerja yaitu 21,425 ton akibat pembebanan gempa. Daya dukung tanah yang diperoleh pada kondisi banjir adalah 15,85 dan untuk factor keamanan yang paling penting diperoleh nilai 1,698 untuk kondisi banjir tanpa memperhitungkan gempa dan 1,697 untuk kondisi banjir pada studi dengan memperhitungkan gempa. Perhitungan manual memperoleh nilai faktor keamanan 2,30 untuk pada kondisi banjir untuk tinjauan tanpa memperhitungkan gempa dan 1,57 untuk nilai faktor geser pada kondisi banjir untuk tinjauan dengan memperhitungkan gempa. Terjadi perpindahan sebesar 0,015 m pada air normal, 0,009m pada air kosong dan 0,022 m pada air banjir, kemudian  $<0,04$  m sesuai dengan kondisi penurunan, maka penurunan yang terjadi pada konstruksi tanggul adalah kondisi aman.

## 2.2 Pengertian Bendung

Air adalah elemen yang penting bagi kehidupan manusia, contoh dari manfaat air sebagai material untuk mengairi lahan persawahan dan pertanian. Tetapi dengan curah hujan yang tidak menentu setiap bulannya berdampak pada tidak menentunya suplay air pertanian dan persawahan yang berdampak bagi kebutuhan air pada lahan pertanian dan persawahan tidak tercukupi. Sehingga, dalam usaha untuk terpenuhinya kebutuhan air sawah tersebut diperlukan suatu konstruksi bangunan air yang dapat mengalirkan air pada lahan persawahan/pertanian. Contoh fungsi konstruksi bangunan air yang berguna untuk persawahan/pertanian adalah bendung.

Bendung merupakan sebuah konstruksi melintang sungai yang bermanfaat untuk menaikkan muka air sungai. Konstruksi tersebut berguna dalam keperluan irigasi dan pemenuhan ketersediaan air baku. Pada proses konstruksi tersebut, sering ditemukan bendung yang mengalami kerusakan dan tidak stabil yang nantinya akan mempengaruhi dari kinerja bendung yang semula direncanakan. Dalam hal tersebut berdampak pada *suplay* air sehingga hasil produksi para petani menjadi berkurang akibat kekurangan air pada musim kemarau. Konstruksi bendung yang akan dikerjakan juga harus memenuhi stabilitas yang menjadi syarat penting untuk memastikan kemampuan dan umur bendung untuk meninggikan muka air sungai yang mengalir ke lahan persawahan.

Bendung merupakan suatu konstruksi yang dibangun menggunakan pasangan batu kali, batu pecah, bronjong ataupun beton yang harus stabil menahan laju dan debit air.

## 2.3 Analisis Stabilitas

Stabilitas pada bendung adalah sebuah perhitungan pada konstruksi yang menentukan ukuran agar mampu memikul gaya dan beban yang bekerja dalam segala keadaan baik normal, banjir, angin kencang dan gempa bumi.

Stabilitas yang diperlukan untuk konstruksi, misalnya tidak ada tanah longsor dilereng dihulu dan hilir bendung, harus aman dari slip, rembesan, dan jebolnya bendung untuk memastikan berfungsinya konstruksi dengan baik.

Syarat stabilitas pada konstruksi bendung:

1. Tidak terjadi tegangan tarik, Jika konstruksi tersebut menggunakan pasangan batu kali dengan selimut beton.
2. Momen guling lebih dari momen tahan.
3. Tak mengalami pergeseran pada konstruksi bendung.
4. Tegangan tanah tidak lebih besar tegangan izin.
5. Tidak mengalami gaya ke atas, atau dengan kata lain harus stabil (*balance*) antara tekanan keatas dan kebawah.

Penyebab terjadinya keruntuhan bangunan gravitasi:

1. *Sliding*/gelincir
2. *Overturning*/guling
3. *piping*/erosi pada bagian bawah tanah.

### 2.3.1 Gaya-gaya yang Bekerja

Gaya-gaya yang bekerja pada bendung memiliki arti yang penting untuk perencanaan adalah:

- a. Tekanan air didalam dan diluar bendung
- b. Tekanan lumpur pada bendung
- c. Gempa yang terjadi
- d. Beban Mati bendung
- e. Gaya Reaksi akibat gempa

### 2.3.2 Gaya Tekan Air

Gaya tekan air pada umumnya dibedakan 2 bagian yaitu gaya hidrostatis dan juga hidrodinamik. Teori tekanan hidrostatis yaitu tekanan yang diciptakan oleh gaya pada cairan untuk medan tekanan pada kedalaman tertentu. Tekanan hidraulik bekerja tegak lurus pada permukaan bangunan. Dalam memudahkan analisis perhitungan, gaya vertikal dan horizontal dihitung masing-masing. Tekanan hidrodinamis relatif jarang diperhitungkan ketika mempertimbangkan stabilitas bendung berenergi rendah.

Gaya tekanan keatas pada bendung diterapkan tidak hanya dibagian luar bendung, tetapi juga didasar bendung dan bagian tubuh bendung. Gaya tekanan (gaya kompresi) Istilah umum untuk pengurangan berat efektif bangunan akibat tekanan air dalam. Tekanan air dalam ekspresi untuk gaya tekan keatas dari bangunan yang dibangun diatas batuan dasar dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$W_u = C \tau_w \left[ h_2 + \frac{1}{2} \xi (h_1 - h_2) \right] A \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana:

$C$  = fraksi luas tekanan hidrostatik

$\tau_w$  = berat jenis air (kN/m)

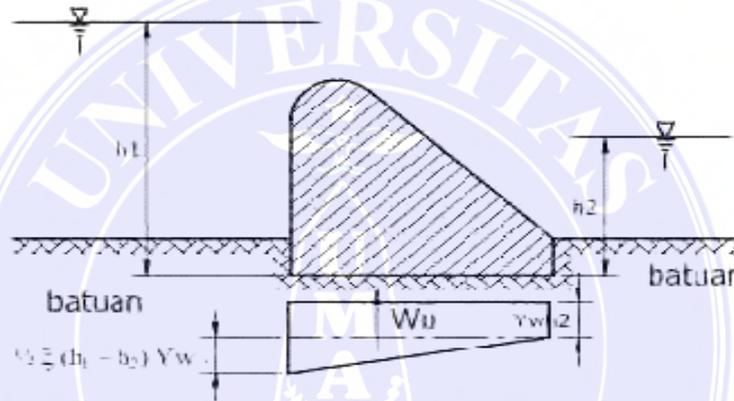
$h_2$  = tinggi air dihilir (m)

$\xi$  = proporsi tekanan

$h$  = tinggi air dihilir (m)

$A$  = luas area (m<sup>2</sup>)

$W_u$  = tekanan keatas resultanta (kN)



Gambar 2.1 Gaya angkat pada pondasi  
Sumber : KP-02

Tabel 2.1 Nilai proporsi tekanan

No	Tipe Pondasi Batuan	$\xi$ (Proporsi tekanan)
1	berlapis horizontal	1
2	sedang, pejal (massive)	0,67
3	baik, pejal	0,5

Sumber : KP-02

Gaya tekan keatas bendungan pada tanah dasar/permukaan tanah yang lebih kompleks dapat ditentukan menggunakan *flowenet*/jaringan aliran air untuk menentukan teori angka rembesan (*weighted creep theory*) menggunakan metode Lane.

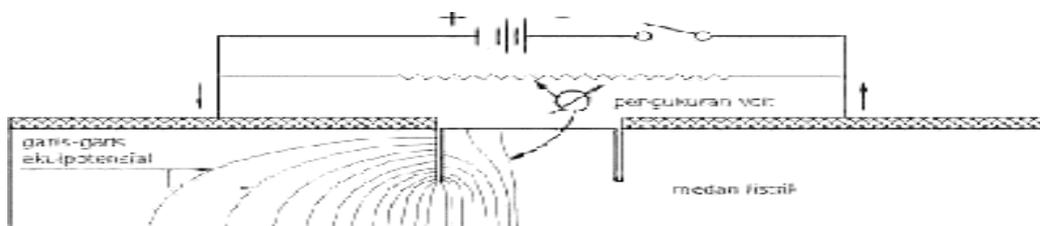
Karena gaya tekan keatas pada bangunan diatas tanah lebih kompleks, gaya angkat keatas pondasi ditentukan menggunakan jaringan aliran/  *flownet*. Jika hal ini sulit dilakukan karena keterbatasan waktu atau kurangnya perangkat lunak untuk menganalisa jaringan air, asumsi teori  *weighted creep* atau yang dikenal dengan teori angka rembesan digunakan oleh Lane dapat digunakan.

Jaringan aliran dapat digambarkan dan dianalisis:

- 1) Menggambar atau Plot manual dengan tangan
- 2) Menggunakan  *software* metode numerik
- 3) Metode menggunakan analog listrik.

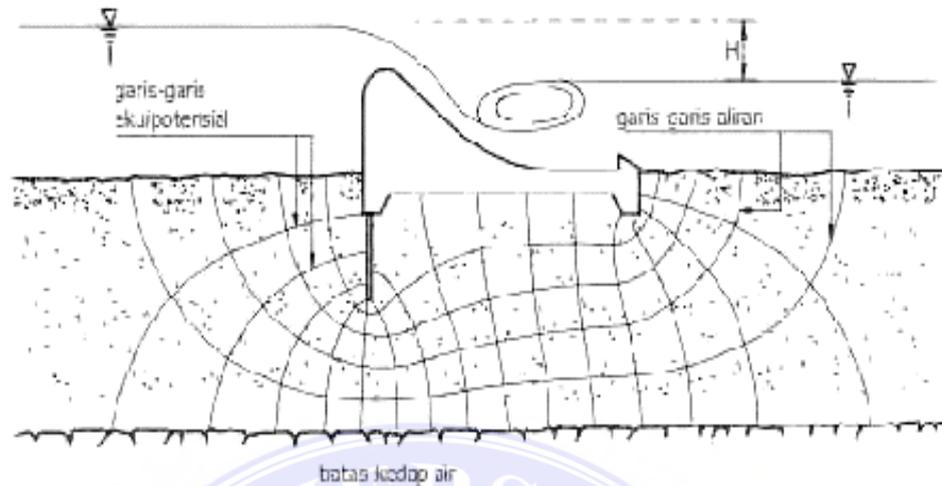
Metode yang menggunakan analog listrik yaitu membandingkan aliran listrik melalui medan listrik dengan daya intermiten yang relative sama dengan aliran air yang melewati pondasi bangunan dengan menyesuaikan besarnya tegangan ditentukan oleh ketinggian piezoelektrik, sedangkan pada daya intermiten ditentukan oleh derajat permukaan tanah dan aliran daya ditentukan oleh laju aliran air.

Pada jaringan aliran bendung utama yang dijelaskan dengan gambar, dapat ditentukan dengan cara penggambaran/*diplot* dengan tangan saja. Pada Gambar 2.3. terlihat contoh penggunaan analog listrik.



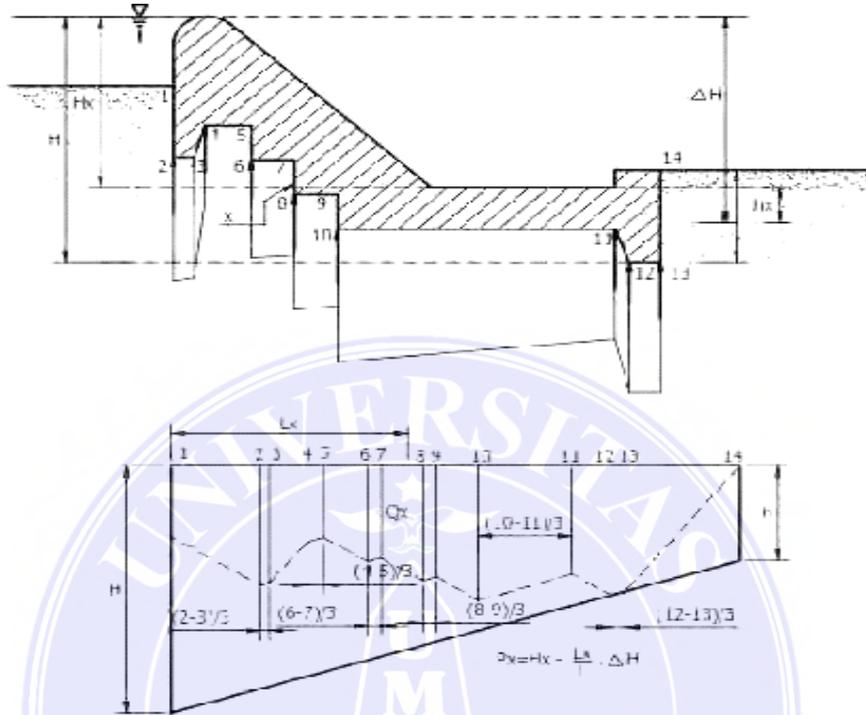
Gambar 2.2 Penggunaan analog listrik

Sumber : KP-02



Gambar 2.3 Contoh jaringan aliran  
Sumber : KP-02

Teori Lane mengasumsikan yaitu bidang horisontal tiga kali lebih lemah daripada bidang vertikal dalam menahan aliran dan rembesan dan membagi perbedaan ketinggian energi dengan panjang relatif disepanjang pondasi bendung, yang digunakan untuk melakukan perhitungan tekanan ke atas pada bagian bawah bendung.



Gambar 2.4 Gaya Angkat pada Pondasi  
Sumber : KP-02

Rumus dibawah menjelaskan gaya angkat dititik x disepanjang dasar bendung, dapat dihitung seperti berikut:

$$P_x = H_x - \frac{L_x}{L} \Delta H \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana:

$P_x$  : gaya angkat dititik x ( $kg/m^2$ )

$L$  : panjang total zona kontak bendung dengan bagian tanah bawah,

$mL_x$  : jarak dari hulu sampai x sepanjang bidang kontak (m)

$\Delta H$  : kenaikan tinggi energi (m)

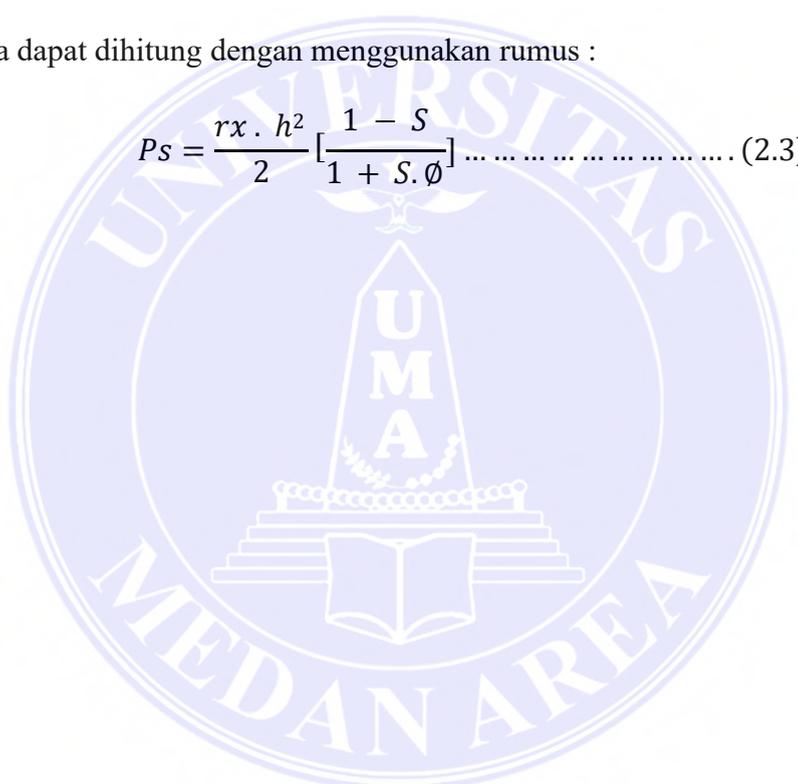
$H_x$  : tinggi energi di hulu bendung (m)

Nilai L dan  $L_x$  yaitu jarak relatif yang dihitung menggunakan metode Lane, dimana bidang yang membuat sudut  $45^\circ$  atau lebih dengan bidang horizontal dianggap vertikal dan dihitung menurut arahnya.

### 2.3.3. Tekanan Lumpur

Pada permukaan hulu atau pintu air bendung tekanan lumpur yang bekerja dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$P_s = \frac{r_x \cdot h^2}{2} \left[ \frac{1 - S}{1 + S \cdot \phi} \right] \dots \dots \dots (2.3)$$



Keterangan rumus:

$P_s$  : gaya yang bekerja secara horizontal pada  $2/3$  kedalaman dari bagian atas lumpur.

$t_s$  : berat lumpur pada bendung

$h$  : ketinggian lumpur (m)

$F$  : sudut gesekan internal (derajat)

$$r_s = r_s' \left[ \frac{G-1}{G} \right] \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana,  $r_s'$  = berat volume kering tanah pada bendung »  $16 \text{ kN/m}^3$   
 ( $1,60 \text{ kgf/m}^3$ )

$\lambda$  = berat volume butiran tanah =  $2,65$

$\tau_s = 10 \text{ kN/m}^3$

Sudut gesekan internal dapat diasumsikan sebesar  $30^\circ$  pada sebagian besar kasus, menghasilkan rumus sebagai berikut:

$$P_s = 1,67 h^2 \dots \dots \dots (2.5)$$

### 2.3.4 Gaya gempa

Gaya gempa diperhitungkan sebagai parameter bangunan guna menghasilkan konstruksi bangunan bendung yang aman terhadap gaya gempa. Nilai ini didasarkan pada peta zonasi gempa Indonesia yang menjelaskan wilayah atau area resiko dimana gempa bumi terjadi. Koefisien densitas gravitasi minimum  $0,1g$  digunakan dengan nilai percepatan. Koefisien ini dianggap sebagai gaya

horizontal pada arah yang tidak aman dihilir bendung dikalikan dengan massa bangunan. Koefisien gempa dianalisis menggunakan persamaan berikut:

$$a_d = n (a_c \times z)^m \dots\dots\dots (2.6)$$

$$E = \frac{a_d}{g} \dots\dots\dots (2.7)$$

Di mana:

- $a_d$  : percepatan gempa (cm/dt<sup>2</sup>),
- $n, m$  : koefisien jenis tanah,
- $a_c$  : percepatan kejut (cm/dt<sup>2</sup>),
- $E$  : koefisien gempa,
- $g$  : percepatan gravitasi (cm/dt<sup>2</sup>),
- $z$  : faktor terhadap letak geografis.

Tabel 2.2 Koefisien jenis tanah

No	Jenis Tanah	N	m
1	Batu	2,76	0,71
2	Diluvium	0,87	1,05
3	Aluvium	1,56	0,89
4	Aluvium Lunak	0,29	1,32

Sumber: KP-06

Tabel 2.3 Periode ulang dan percepatan dasar gempa

No	Periode ulang *)	
	Tahun	$a_c$ *) (gal = cm/dt <sup>2</sup> )
1	20	85
2	100	160
3	500	225
4	1000	275

Sumber: KP-06

### 2.3.5 Berat Bangunan

Berat bangunan direncanakan tergantung pada material yang digunakan dalam konstruksi. Dalam merencanakan, disarankan menggunakan harga/nilai dari berat volume dibawah ini:

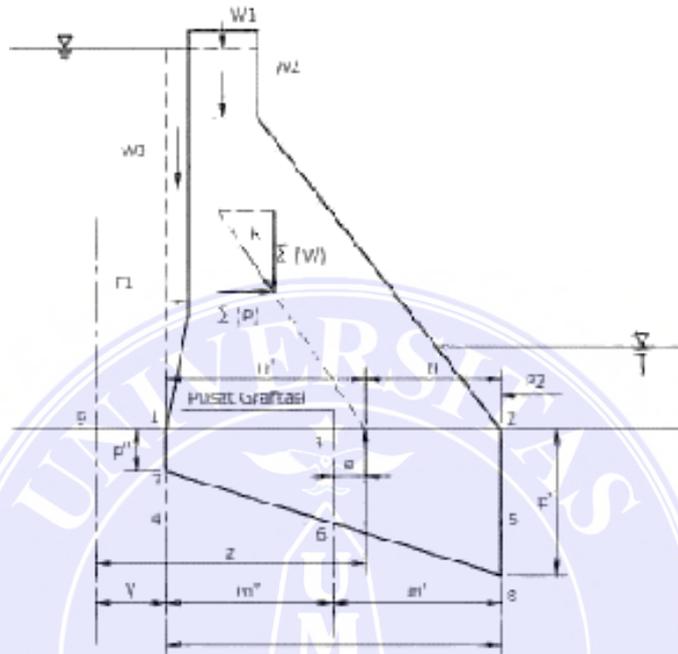
Tabel 2.4 Volume bangunan

No.	Item	Berat volume
1	Pasangan dengan batu	2,200 kgf/m <sup>3</sup>
2	Beton tumbuk	2,300 kgf/m <sup>3</sup>
3	Beton bertulang	2,400 kgf/m <sup>3</sup>

Berat volume beton yang dihancurkan bergantung pada berat volumetrik agregat dan ukuran maksimum agregat kasar. Jika ukuran maks. agregat kasar adalah 150 mm, maka berat volumetriknya adalah 2.65 dan berat volumetriknya adalah 2.400 kgf/m<sup>3</sup> atau lebih.

### 2.3.6 Reaksi Pada Pondasi

Diasumsikan bahwa reaksi utama yang terjadi berbentuk trapesium dan dapat digambarkan sebagai terdistribusi secara linier.



Gambar 2.5 Distribusi tekanan pada pondasi  
Sumber : KP-02

Persamaan yang disajikan dibawah ini merupakan rumus yang turunan dari mekanika sederhana. Tekanan vertikal pada pondasi :

$$P = \frac{\Sigma(W)}{A} + \frac{\Sigma(W)e}{I} \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana:

P : Tekanan pada vertikal pondasi

Σ(W) : Total gaya vertikal yang bekerja,  
(termasuk tekanan keatas, tetapi gaya reaksi pondasi tidak diperhitungkan)

A : luas bagiandasar (m<sup>2</sup>)

- e : eksentritas beban /jarak pusat gravitasi dasar ketitik perpotong resultan dan dasar pondasi.
- I : momen inersia dasar terhadap pusat gravitasi.
- m : jarak (dari pusat alas ketitik tekan yang diinginkan)

Untuk bentuk podasi dasar segi empat dengan panjang dan lebar 1,0 m,  $I = 1/12 l^3$  dan  $A = 1$ , rumus sebelumnya menjadi:

$$P = \frac{\Sigma(W)}{A} + \left\{1 + \frac{12e}{E^2} m\right\} \dots \dots \dots (2.9)$$

Tekanan vertikal pada pondasi yang terjadi ditepian bendung dapat dihitung menggunakan rumus:

$$P' = \frac{\Sigma(W)}{B} + \left\{1 + \frac{6e}{B}\right\} \dots \dots \dots (2.10)$$

jika asumsi  $m' = m'' = 1/2 l$ , maka

$$P'' = \frac{\Sigma(W)}{B} + \left\{1 + \frac{6e}{B}\right\} \dots \dots \dots (2.10)$$

Tekanan negative dihasilkan pada ujung bangunan Jika nilai  $e > 1/6$ . Tegangan tarik tidak diperbolehkan dalam tanah bagian pondasi dan irisan harus berbentuk persegi panjang sehingga semua gaya resultan diterapkan sedemikian rupa sehingga beban diterapkan pada area ini.

## 2.4. Kebutuhan Indikator Stabilitas

Persyaratan stabilnya bendung dihitung dengan menganalisis gaya-gaya yang akan berdampak pada kinerja bendung sesuai dengan standar kriteria perencanaan.

### 2.4.1 Stabilitas Terhadap Gelincir

Stabilnya bendung terhadap geser dijelaskan dalam tg dan sudut antar garis vertikal dan resultan gaya yaitu : gaya angkat dan gaya yang bekerja < koefisien gesek izinnya.

$$\frac{\sum(H)}{\sum(V - U)} = \tan \theta < \frac{f}{S} \dots \dots \dots (2.12)$$

Dimana :

$\sum(H)$  : Total gaya horizontal(kN)

$\sum(V - U)$  : Total gaya vertikal (V).  
dikurangi gaya tekan keatas yangbekerja (kN)

$\theta$  : sudut resultan gaya, terhadap garis vertikal (derajat)

f : koefisien terhadap gesek

S : faktor keamanan yang digunakan

Untuk Perkiraan nilai koefisien gesekan f diberikan pada tabel dibawah ini:

Tabel 2.5 Harga perkiraan koefisien gesekan

No	Bahan	f
1	Pasangan batu pada pasangan batu	0,60 - 0,75
2	Batu keras berkualitas baik	0,75
3	Kerikil	0,50
4	Pasir	0,40
5	Lempung	0,30

Sumber : KP-02

Pada konstruksi sederhana yang telah disebutkan diatas, dimana umur bangunan yang lebih pendek, kerusakan dan bencana besar tidak diperhutingkan, nilai faktor keamanan yang diijinkan yaitu 2,0 pada kondisi normal dan 1,25 pada kondisi ekstrim.

Pada kondisi ekstrim dijelaskan yakni:

1. Pada saat terjadinya gempa tidak air yang mengalir diatas mercu,
2. Banjir rencana maksimum.

Jika bahan bangunan menggunakan beton dan nilai koefisien slip kategori keamanan berdasarkan gesekan saja melebihi, maka dapat dinyatakan stabil apabila faktor keamanan dari persamaan termasuk geser > faktor keamanan yang ditetapkan.

$$\Sigma(H) \leq \frac{f \Sigma (V - U) + C.A}{S} \dots \dots \dots (2.13)$$

Keterangan:

C : Kekuatan geser bahan ( $\text{kN/m}^2$ )

A : Luas dasar ( $\text{m}^2$ )

Jika nilai keamanan geser diperhitungkan, nilainya sama dengan nilai yang hanya mempertimbangkan gesekan, yaitu 2.0 pada kondisi normal dan 1.25 untuk kondisi ekstrim. Pada struktur beton, satuan kekuatan geser dapat diasumsikan sebesar  $110 \text{ tf/m}^2$  atau  $1100 \text{ kN/m}^2$ .

Untuk persamaan 2.13 hanya dipakai pada badan bendungan saja. Sedangkan untuk pondasi, harus memastikan bahwa bendungan memiliki kualitas dan kekuatan yang tinggi dibuktikan dengan hasil uji lapangan dan laboratorium. Untuk material dengan pondasi non-perekat, rumus yang melibatkan gesekan saja yang digunakan.

#### 2.4.2. Ketahanan Bendung Terhadap Guling

Persyaratan agar bendung aman dari penggulingan adalah bahwa gaya-gaya resultan yang bekerja dibagian bangunan atas dibidang horisontal harus berpotongan dengan bidang diteras. Tidak boleh berpotongan pada tegangan.

Tingkat tegangan internal pada pondasi dan bangunan dipertahankan dinilai maksimum yang direkomendasikan. Untuk beton, ini setara dengan sekitar  $4,0 \text{ N/mm}^2$ , sementara pada pasangan bata wajib memiliki kekuatan min  $1,5 - 3,0 \text{ N/mm}^2$ .

Tabel 2.6 Nilai daya dukung izin

No	Jenis Tanah	Daya Dukung	
		kN/m <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>
1	Batu sangat Keras	10,000	100
2	Batu kapur/batu pasir keras	4,000	40
3	Kerikil berkerapatan sedang atau pasir dan kerikil	200 – 600	2 - 6
4	Pasir berkerapatan sedang	100 – 300	1 - 3
5	Lempung kenyal	150 – 300	1,5 - 3
6	Lempung teguh	0,75 - 75 – 150	1,5
7	Lempung lunak dan lumpur	1 < 75	< 0,75

Sumber : British Standard, 2004

Setiap bagian pada bendung diasumsikan berdiri sendiri atau tidak terjadi distribusipada gaya yang bekerja pada *bending momen*. sehingga kolam olak wajib memiliki tebal lantai sebagai berikut :

$$d_x = S \frac{P_x - W_x}{\gamma} \dots \dots \dots (2.14)$$

Keterangan:

$d_x$  : tebal lantai dititik x (m)

$P_x$  : gaya angkat dititik x (kg/m<sup>2</sup>)

$W_x$  : kedalaman air dititik x (m)

$\gamma$  : berat jenis bahan yang digunakan (kg/m<sup>3</sup>)

S : nilai faktor keamanan yang digunakan

(1.25 untuk kondisi ektrim dan 1.5kondisi normal)



bahaya akibat erosi bawah permukaan diperiksa dengan membuat jaringan *flownet*. Dalam pengerjaan yang sering menemukan kesulitan seperti keterbatasan waktu untuk mengerjakan dan tidak adanya *software* untuk menganalisa data, maka perhitungan dapat menerapkan beberapa metode, yaitu: metode bligh, koshia dan lane.

Metode Lane sering dikatakan sebagai Metode Laju Penetrasi Lane (*Weighted creep ratio method*), sebagai kajian dan referensi direkomendasikan untuk memeriksa apakah bangunan utama bendung tidak terkikis dibawah tanah. Hasil dari metode ini adalah aman atau tidaknya suatu bendung terhadap erosi. Pada bangunan yang sederhana, metode lain relative dapat menghasilnya *output* yang lebih baik, namun pengerjaannya lebih sulit.

Prinsip dari metode Lane adalah membandingkan panjang jalur rembesan di bawah bangunan sepanjang area kontak antara pondasi dan bangunan yang berbatasan langsung dengan perbedaan permukaan air tanah dikedua sisi bendung. Di sepanjang jalur ini, lereng yang lebih curam dari 45° dianggap vertikal dan lereng yang kurang dari 45° dianggap horizontal. Jalur vertikal dianggap memiliki resistensi tiga kali lebih kuat terhadap aliran daripada jalur horizontal.

Angka rembesan dengan metode lane dapat diselesaikan dengan persamaan:

$$C_L = \frac{\sum L_v + \frac{1}{3} \sum L_H}{H} \dots \dots \dots (2.15)$$

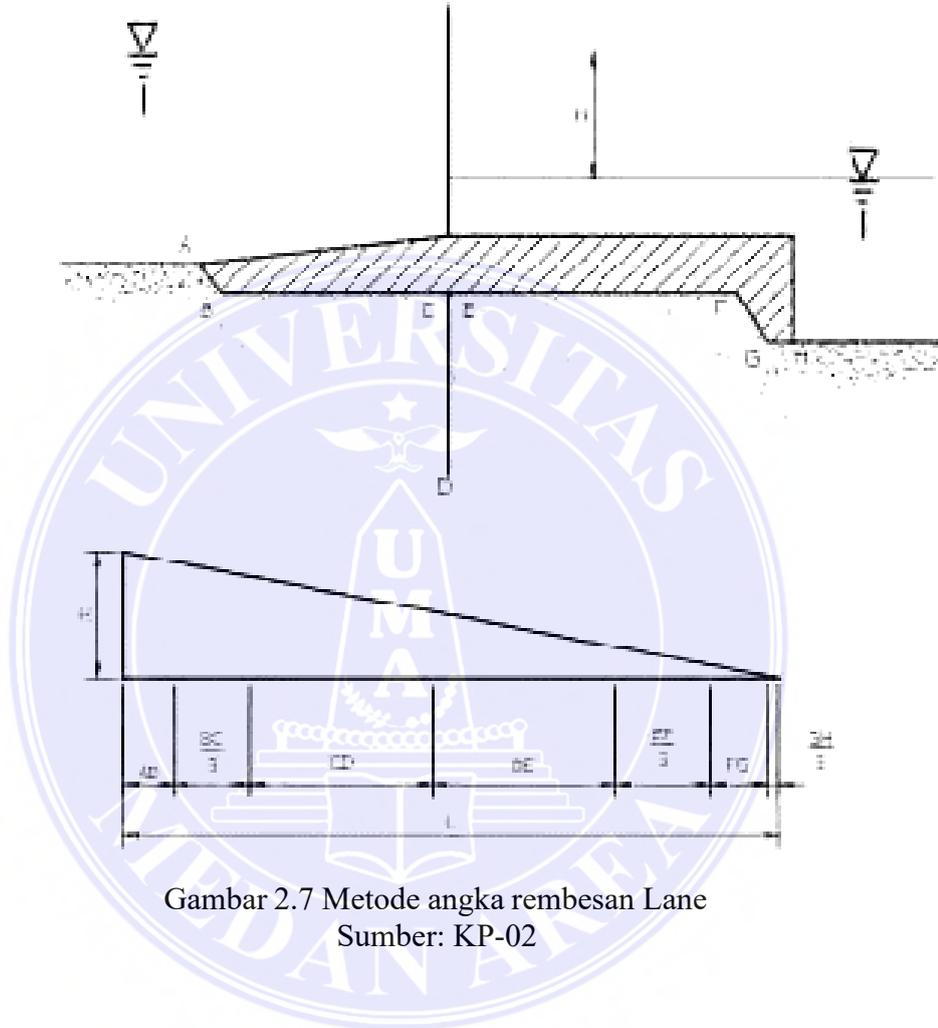
Dimana:

$C_L$  : Angka rembesan Lane

$L_v$  : Jumlah panjang vertikal (m)

$L_H$  : Jumlah panjang horizontal (m)

$H$  : perbedaan ketinggian muka air (m)



Gambar 2.7 Metode angka rembesan Lane  
Sumber: KP-02

Tabel 2.7 Nilai angka rembesan Lane

No	Bahan	C <sub>L</sub>
1	Pasir sangat halus	8,5
2	Pasir halus	7,0
3	pasir sedang	6,0
4	Pasir kasar	5,0
5	kerikil halus	4,0
6	Kerikil sedang	3,5
7	Kerikil kasar termasuk berangkal	3,0
8	Bongkah dengan sedikit berangkal dan kerikil	2,5
9	lempung lunak	3,0
10	Lempung sedang	2,0
11	Lempung keras	1,8
12	Lempung sangat keras	1,6

Sumber: KP-02

Angka rembesan yang disajikan pada tabel diatas digunakan dengan kondisi sebagai berikut

- 100% jika tidak ada pembuang yang digunakan selama konstruksi, tidak ada jaringan aliran yang dibangun dan tidak ada survey yang dimodelkan,
- 80% jika ada pembuang tetapi tidak ada survey atau jaringan aliran,
- 70% jika semua struktur tertutup.

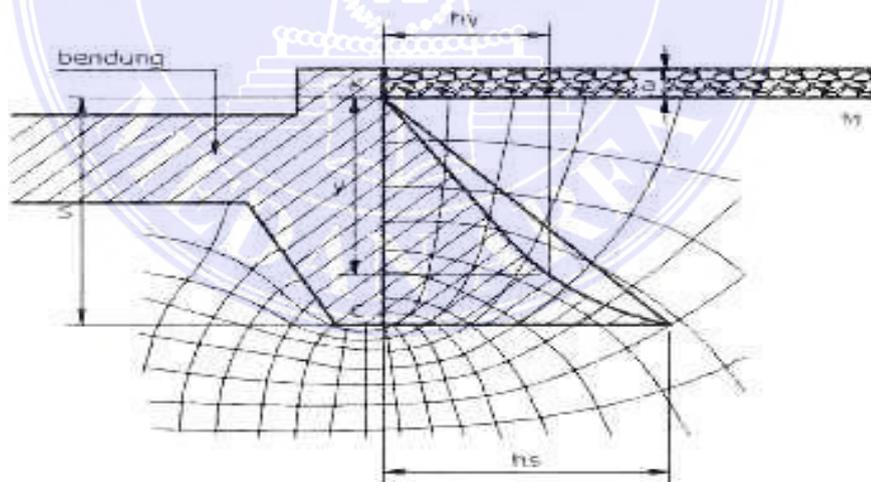
Menurut Creagen, dkk., hal ini mengindikasikan bahwa studi terperinci dapat memberikan keamanan yang lebih baik. Dalam usaha meminimalisir erosi bawah permukaan, tinggi pondasi hilir direncanakan sebagai dasar ambang hilir. Untuk menentukan gaya tekan keatas, dasar hilir ditentukan sebagai bagian atas ambang ujung. Keamanan terhadap kegagalan dibagian hilir bangunan dapat dipastikan menggunakan persamaan:

$$S = \frac{s - (1 + \frac{a}{S})}{h_s} \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana:

- S : faktor keamanan
- s : tebal tanah (m)
- a : kedalaman lapisan pelindung (m)
- h<sub>s</sub> : tekanan air (kg/m<sup>2</sup>)

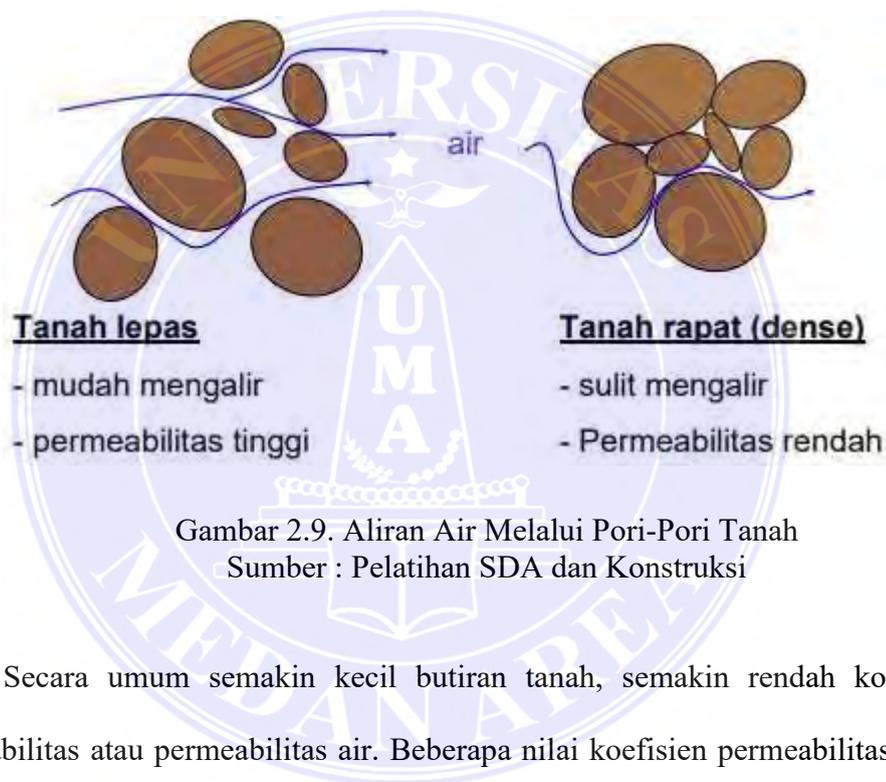
Gambar 2.8 menjelaskan tentang simbol-simbol yang digunakan. Tekanan air pada titik C dapat ditentukan dari jaringan aliran/garis angka rembesan jalur. Persamaan diatas menyatakan bahwa volume tanah didalam air dapat diatur menjadi 1 (g<sub>w</sub> = g<sub>s</sub> = 1). Berat volumetrik material yang dilindungi dalam air adalah 1 dan nilai keamanan S yang digunakan lebih besar atau sama dengan 2.



Gambar 2.8 Sketsa parameter stabilitas  
Sumber : KP-02

## 2.5 Tekanan Air

Tekanan air pori diukur relatif terhadap tekanan udara. Jika permukaan air sama dengan tekanan udara, maka disebut sebagai permukaan air tanah atau permukaan uap air. Dibawah permukaan air, tanah biasanya mendekati 100% jenuh. Permeabilitas/kelarutan air bergantung pada ukuran rata-rata butiran tanah, yang berhubungan pada bentuk partikel, struktur tanah dan pembagian butiran tanah.



Secara umum semakin kecil butiran tanah, semakin rendah koefisien permeabilitas atau permeabilitas air. Beberapa nilai koefisien permeabilitas tanah yakni:

- kerikil:  $>1$  cm/dtk atau lebih
- kerikil dengan pasir : 10-2 hingga 1 cm/dtk
- pasir butir halus, lanau, lanau berlempung: 10<sup>-5</sup> sampai 10<sup>-7</sup> cm/dtk
- lempung, lanau berlempung :  $<10^{-5}$  cm/dtk

Koefisien permeabilitas ( $k$ ) untuk air yang melewatinya diperoleh dengan uji lapangan dan lab. Air dalam tanah dapat diperoleh sebagai berikut:

- a. air tanah,
- b. air,
- c. higroskopis.

Air bebas yaitu cairan yang mengalir dari permukaan kedalam tanah dan bergerak kebawah dibawah gaya gravitasi hingga mencapai lapisan kedap air. Muka air disebut dikenal dengan muka air tanah. Nilai dari tekanan permukaan air tanah yaitu 1 bar. Air yang berada dibawah muka air tanah disebut dengan air tanah, yang terkandung didalam pori-pori dan bersifat higroskopis karena daya tarik antar molekul.

Pori-pori didalam tanah tidak dapat dipisahkan, sehingga air pada pori dapat mengalir melalui ruang kosong. Proses air mengalir melalui pori disebut permeasi dan kemampuan perembesan tanah disebut permeabilitas.

Dalam Teknik Sipil permeabilitas sangat penting dan berperan dalam hal-hal berikut :

- a. Potensi rembesan air pada bendung.
- b. Penentuan jumlah dan laju penurunan tanah.
- c. Stabilitas lereng yang digali
- d. Laju rembesan.

Indikator yang mempengaruhi rembesan yaitu:

- a. Dimensi butiran
- b. Kandungan pori
- c. Komposisi tanah
- d. Struktur tanah
- e. Tingkat kejenuhan.

Kegagalan bendung sering terjadi karena tidak ada peraturan baku untuk menganalisis maupun memprediksi masalah rembesan yang akan terjadi. Rumus empiris yang didasarkan pada penelitian dan kinerja meskipun berguna dalam beberapa kasus, umumnya tidak valid untuk bahan pondasi, timbunan, dan media yang sedikit berbeda. Air didalam waduk selalu berusaha keluar melalui saluran yang lemah. Saluran ini dapat melewati pondasi, bangunan utama dan sekitar pelimpah bendungan. Masalah rembesan yang dapat menyebabkan penurunan tanah dapat dipengaruhi beberapa hal:

- a. Berlebihan tekanan angkat,
- b. *Piping*,
- c. Erosi internal,
- d. Terurainya material batuan,
- e. Pembasahan lereng hilir karena tekanan rembesan yang berlebihan atau kejenuhan (*sloughing*).

Teori rembesan Pada tahun 1856, ahli hidrologi Perancis Henry Darcy melakukan eksperimen mengenai aliran air yang dapat memasuki tanah. Kecepatan

air yang mengalir melalui lapisan tanah sangat kecil sehingga alirannya dapat dianggap laminar. Percobaan tersebut menunjukkan bahwa kecepatan aliran yang memasuki atau meninggalkan lapisan tanah sebanding dengan gradient hidrolisnya.

Dengan hukum Darcy, hal-hal berikut ini harus diperhatikan:

- a. Kecepatan aliran/ fluida ( $V_d$ ) yang dijelaskan sebagai laju aliran total yang mengalir melalui luas penampang tanah pada satuan waktu. Karena aliran hanya terjadi melalui pori, maka aliran air actual atau laju infiltrasi ( $V_s$ ) dari satu molekul air yang melalui saluran pori-pori tanah lebih besar daripada laju debit.
- b. Laju infiltrasi diasumsikan sama dengan laju debit dibagi dengan porositas tanah.
- c. Hukum Darcy berlaku untuk aliran laminar dimana aliran air yang sejajar ( $V_d$  sebanding dengan *gradient* hidrodinamika). Hukum ini berlaku untuk sebagian besar tanah, tetapi aliran melalui kerikil kasar atau bukaan batuan dasar dapat bergejolak dan  $V_d$  mungkin sebanding dengan akar kuadrat dari  $i$ .
- d. Hukum Darcy terbatas pada aliran melalui material jenuh. Aliran melalui material tidak jenuh bersifat sementara dan bergantung pada waktu.
- e. Hukum Darcy tidak cocok untuk aliran melalui retakan dan celah-celah pada batuan dan tanah.

### 2.5.1 Tekanan Hidrostatik

Tekanan hidrostatik memiliki fungsi kedalaman di bawah permukaan

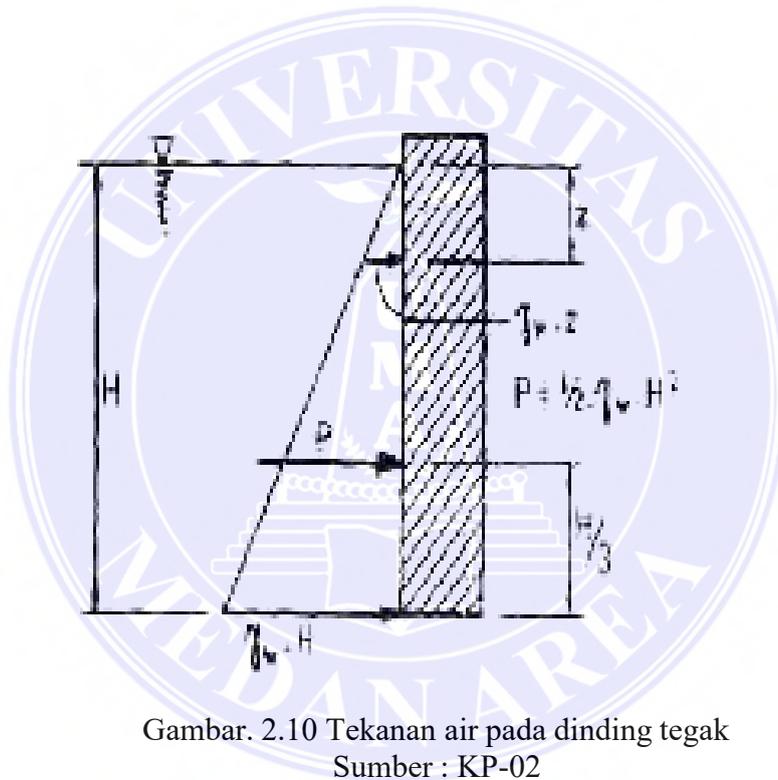
air dansama dengan:

$$PH = rWz \dots \dots \dots (2.17)$$

Dimana: PH : tekanan hidrostatik (kN/m<sup>2</sup>)

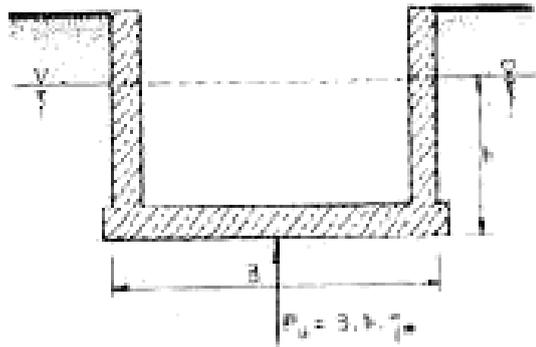
$\tau_w$  : berat volume air (kN/m<sup>3</sup>)

z : jarak dan permukaan air bebas (m).



Gambar. 2.10 Tekanan air pada dinding tegak  
Sumber : KP-02

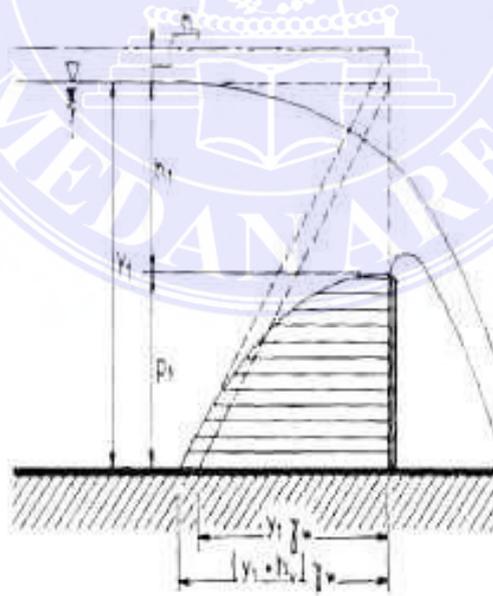
Gaya *uplift* atau tekan ke atas yang bekerja pada lantai bangunan memiliki nilai yang sama dengan berat volume air yang dipindahkan.



Gambar 2.11 Gaya tekan air ke atas  
Sumber : KP-02

### 2.5.2 Tekanan Hidrodinamik

Nilai hidrodinamik hanya sedikit atau tidak berpengaruh pada jenis bangunan yang digunakan untuk jaringan irigasi dan oleh karena itu jarang diperlukan. Prinsip dari gaya hidrodinamika adalah semakin tinggi energy dari kecepatan yang mendekat, semakin besar tekanan pada dinding .



Gambar 2.12 Tekanan hidrodinamik  
Sumber : KP-02

## 2.6 Beban Gempa

Beban gempa yang diperlukan untuk perencanaan fasilitas penyediaan air bersih didapat dalam bentuk peta yang bersumber pada Standar Indonesia : DPMA, 1981 yang berjudul “Peta Zona Gempa untuk Perencanaan Bangunan Air Tahan Gempa”, sudah tidak berlaku.

Peta ini didasarkan SNI 03-1726-2002 dan literatur normatif lainnya tentang prosedur perencanaan gempa untuk bangunan gedung:

- a. RSNI M-02-2002 Tentang Metode Analisis dan cara Pengendalian rembesan air untuk Bendung Urugan
- b. RSNI M – 03-2002 Tentang Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungantipe Urugan
- c. RSNI T-01-2002 Tentang Tata Cara desain Tubuh Bendungan Tipe Urugan

Percepatan gempa dapat dianalisis dengan persamaan berikut:

$$a_d = n (a_C \cdot Z) m,$$

$$E = a_d / g$$

di mana:

$a_d$  : percepatan gempa ( $cm/dt^2$ )

$n, m$  : koefisien jenis tanah

$a_C$  : percepatan kejut dasar ( $cm/dt$ )

$e$  : koefisien gempa

$g$  : percepatan gravitasi ( $\text{cm/dt}^2$ )

$z$  : faktor yang bergantung kepada letak geografis

Tabel 2.8 Koefisien zona gempa

Zona	Koefisien Zona Z
A	0,1 - 0,30
B	0,30 - 0,60
C	0,60 - 0,90
D	0,90 - 1,20
E	1,20 - 1,40
F	1,40 - 1,60

Sumber : Rpt

Faktor yang mempengaruhi evaluasi gempa yaitu :

- 1) Tingkat kerusakan pada bendung dan bangunan pengairan;
- 2) Tingkat resiko dari bangunan yang sudah selesai ;
- 3) Tipe bendungan dan jenis potensi keruntuhan yang mungkin terjadi.

Koefisien gempa yang dihitung diatas digunakan pada perhitungan stabilitas sebagai gaya horisontal dengan mengalikan beban mati bangunan dengan koefisien-koefisien tersebut.

## 2.7 Kombinasi Pembebanan

kombinasi pembebanan serta peningkatan pada tegangan izin rencana disajikan pada tabel 2.9.

Tabel 2.9 Kombinasi Pembebanan

No	Kombinasi Pembebanan	Kenaikan tegangan izin
1	M + H 6 K T+ Thn	0%
2	M + H 6 K T+ Thn + G	20%
3	M + H 6 K T+ Thb	20%
4	M + H 6 K T+ Thb + G	50%
5	M + H 6 K T+ Thb + Ss	30%

Dimana:

- H : Beban hidup  
M : Beban mati  
T : Beban tanah  
K : Beban kejut  
G : Beban gempa  
Thn : Tekanan air normal  
Thb : Tekanan air selama banjir  
Ss : Pembebanan sementara selama pelaksanaan

## 2.8 Tegangan Izin dan Faktor Keamanan

### 2.8.1 Tegangan Izin

Tegangan izin pada beton bertulang, baja dan kayu ditentukan dengan persyaratan standar berikut:

1. Peraturan Beton Bertulang Indonesia
2. Peraturan Perencanaan Konstruksi Baja
3. Peraturan Perencanaan Bangunan Baja Indonesia (Jembatan dan Gedung)
4. Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia
5. Tegangan yang diijinkan untuk pasangan bata dan bata merah adalah sebagai berikut:
  - a. Pasangan bata  $\sigma_d = 7 \text{ N/mm}^2$
  - b. Bata merah  $\sigma_d = 2,5 \text{ N/mm}^2$
  - c. Bangunan dan dinding tidak boleh terkena tegangan tarik.

### 2.8.2 Faktor keamanan

- a. Nilai faktor keamanan terhadap *overturning* atau bahaya guling diberikan pada Tabel 2.10 untuk berbagai kombinasi pembebanan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 faktor keamanan terhadap guling

Kombinas Pembebanan	Faktor Keamanan ( $F_g$ )
1	1,5
2	1,3
3	1,3
4	1,1
5	1,2

Dimana:

$M_g$  : Momen total penyebab guling

Mt : Momen tahan

Fg : Faktor keamanan

- b. Nilai faktor keamanan terhadap *sliding* /gelincir ditampilkan pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11 Faktor keamanan terhadap gelincir

Kombinasi Pembebanan	Faktor Keamanan ( $F_s$ )
1	1,5
2	1,3
3	1,3
4	1,1
5	1,2

Dimana:

r : tegangan izin maks ( $\text{kN/m}^2$ )

r : tegangan gelincir ( $\text{kN/m}^2$ )

$F_s$  : faktor keamanan

Faktor keamanan untuk gaya tekan keatas sebaiknya diambil nilai 1,1 sampai dengan 1,5.

## 2.9 Cara Pengendalian Rembesan

Ada tiga metode praktis untuk mengendalikan rembesan:

- penyaring berfungsi mencegah pengangkutan butiran material
- membatasan debit rembesan.
- metode drainase yang mengurangi tekanan rembesan dan mengumpulkannya didalam struktur saluran pembuangan yang aman.

- d. kombinasi dari tiga metode a,b,c.

Pengendalian rembes yang efektif didasarkan pada kondisi bendungan dan pondasinya. Terlepas dari pertimbangan-pertimbangan ini dalam desain bendungan, beberapa bendungan telah gagal karena rembesan. Kegagalan ini telah memberikan wawasan dan referensi pada kasus rembesan.

### 2.9.1 Pola Kegagalan Akibat Rembesan

Air pada waduk selalu mencoba untuk keluar melewati saluran yang paling lemah. Saluran tersebut dapat melewati tubuh waduk, pondasi dan pada tumpuan. Terjadinya rembesan yang dapat menyebabkan terjadinya runtuh dikategorikan sebagai berikut:

- a. Berlebihannya tekanan angkat,
- b. *Piping*
- c. Erosi internal,
- d. Terurainya (*solutioning*) material,
- e. pembasahan lereng hilir (*sloughing*) akibat adanya Tekanan rembesan berlebihan atau penjenahan.

### 2.9.2 Tekanan Angkat (*Blow Out*)

Tekanan angkat dilapisan pondasi permeable dapat mengakibatkan gaya angkat yang signifikan dipondasi yang tertekan dibagian hilir. Tekanan angkat disebabkan oleh lapisan berpori yang memindahkan sebagian besar tekanan air waduk kehilir. Ketika tekanan air pori dibagian bawah lapisan yang tertekan lebih

besar daripada tekanan lapisan tanah penutup di atasnya, keruntuhan pun dimulai. Tekanan ke atas ini, yang dikenal sebagai ledakan yang disebut dengan *blowout*.

Jika alirannya kuat untuk membawa material tanah, pasir biasanya diendapkan pada kantong lumpur, membentuk cincin berbentuk kerucut yang dikenal sebagai *sand boil*. Pelepasan material pasir secara terus menerus karena gradient hidrolis yang berlebih akan menghasilkan pipa yang menyebabkan strukturnya runtuh. Pola runtuh tersebut dijelaskan:

- a. Tipe A, dimana gradient air yang diberikan bersifat statis dan tidak mengindikasikan adanya masalah. Namun, ketika gradient hidraulik menjadi ekstrim, maka dapat berkembang dari Tipe A menjadi Tipe B bahkan Tipe C, tergantung pada gradient hidraulik dan kondisi tanah pada tubuh bendungan dan pondasi.
- b. Tipe B, material pembawa pasir yang dimulai didekat muka tanah. Jenis tanah ini mewakili masalah serius yang membutuhkan tindakan lebih serius.
- c. Tipe C, mewakili situasi kritis dimana gradient air yang mengangkut butiran tanah dibawahnya secepat mungkin segera diatasi. Pizometer dapat digunakan dalam memonitor tekan angkat pada pondasi hilir dan mendeteksi kondisi tidak aman sebelum terjadinya keruntuhan. Petunjuk awal adalah pengangkutan material halus dari pasir yang mendidih atau kekeruhan air limpasan dan pengangkutan material halus.

### 2.9.3 *Piping* (Erosi Buluh)

*Piping* (erosi buluh) terjadi ketika air dari waduk mengalir melalui pori-pori tanah (rembesan), menciptakan gaya tarik pada partikel-partikel tanah, yang

terbawa kesaluran rembesan hilir. Diagram dibawah ini mengilustrasikan terjadinya keruntuhan *piping* akibat gradient hidrolik yang berlebihan diujung bendungan. Secara fisik, *piping* dimulai dari lereng hilir dengan terbentuknya kerucut yang disebut boil dan keluarnya air keruh. Pembawaan butiran halus terus berlanjut ke hulu, membentuk pipa-pipa ditubuh bendungan dan pondasi.

Ada lima kondisi yang memicu terjadinya pipa:

- a. Terbentuknya saluran aliran air,
- b. *Gradient* hidrodinamika dilokasi keluaran melebihi nilai batas untuk jenis tanah yang berbeda ;dan
- c. Lokasi keluaran terbuka dan tidak cukup terlindungi oleh filter;
- d. Terdapat tanah yang mudah disalurkan kedalam jalur aliran air rembesan
- e. Terbentuk 'pipa' atau tanah di atasnya membentuk 'atap' dan mempertahankan bukaan 'pipa'.

Pada kegagalan *piping*, butiran tanah pertama kali terbawa pada aliran rembesan tertentu pada gradient hidraulik diatas batas tertentu. Arus erosi dan pipa cenderung membesar dibagian hulu, diikuti dengan peningkatan limpasan. Hal ini terjadi karena tingkat tekanan hidrolik ( $h$ ) antara hulu dan hilir tetap sama selama ketinggian air diwaduk dijaga konstan, tetapi gradien hidrolik ( $h/L$ ) meningkat dan panjang saluran ( $L$ ) memendek karena butiran-butiran tanah terbawa arus membentuk pipa. Oleh karena itu, kecepatan aliran akan meningkat secara progresif sampai tekanan air dilepaskan. Oleh karena itu, penting untuk menghentikan *piping* sesegera mungkin. *Piping* sering terjadi dalam kondisi berikut:

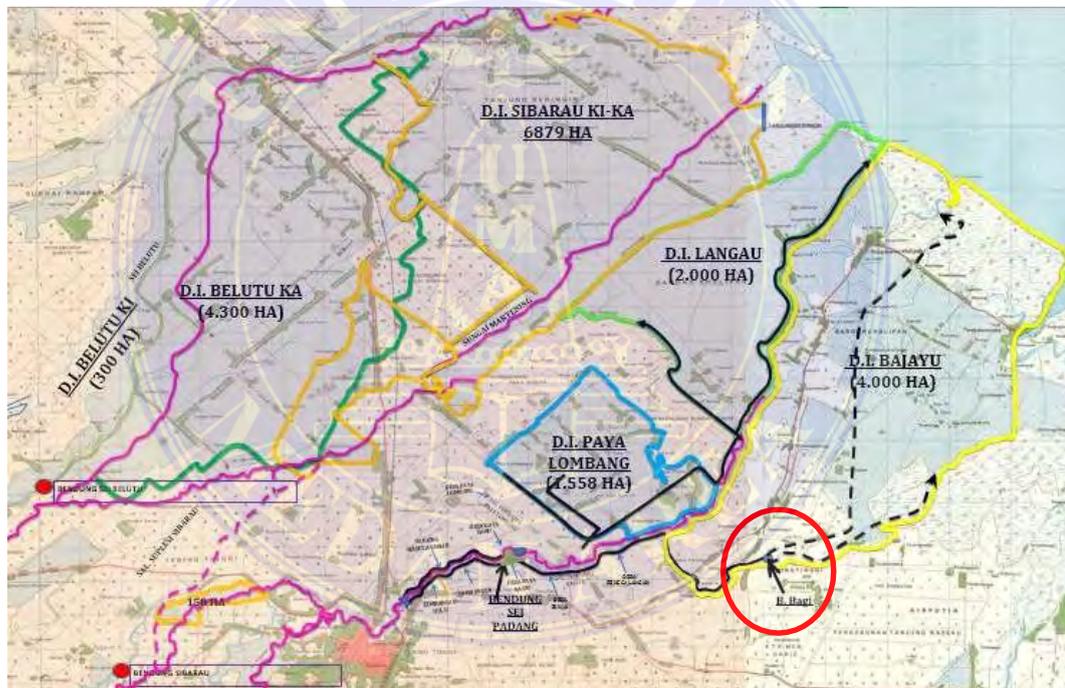
- a. Tidak ada tindakan pengurangan rembesan yang dilakukan untuk mengurangi gradient hidraulik saat merembes melalui lapisan tanah yang rawan erosi.
- b. Tidak ada penyaring atau tindakan pengurangan tekanan rembesan untuk mencegah butiran tanah terbawa ke saluran keluar; dan
- c. langkah-langkah pengurangan rembesan tidak dilaksanakan dengan benar.

Tanah yang rentan terhadap *piping* adalah tanah yang kohesif dan gembur, pasir halus bergradasi buruk, dengan potensi tinggi untuk *piping* adalah lumpur dan pasir yang mengandung  $PI < 6\%$ , seperti pasir campur kerikil urai yang bergradasi baik yang gradasinya lebar dan mempunyai butiran halus plastisitas rendah. Tanah lempungan dengan  $PI > 15\%$  butiran halus, yang cukup tahan terhadap *piping*. Namun, tanah yang tahan terhadap *piping* mungkin lebih rentan terhadap erosi internal.

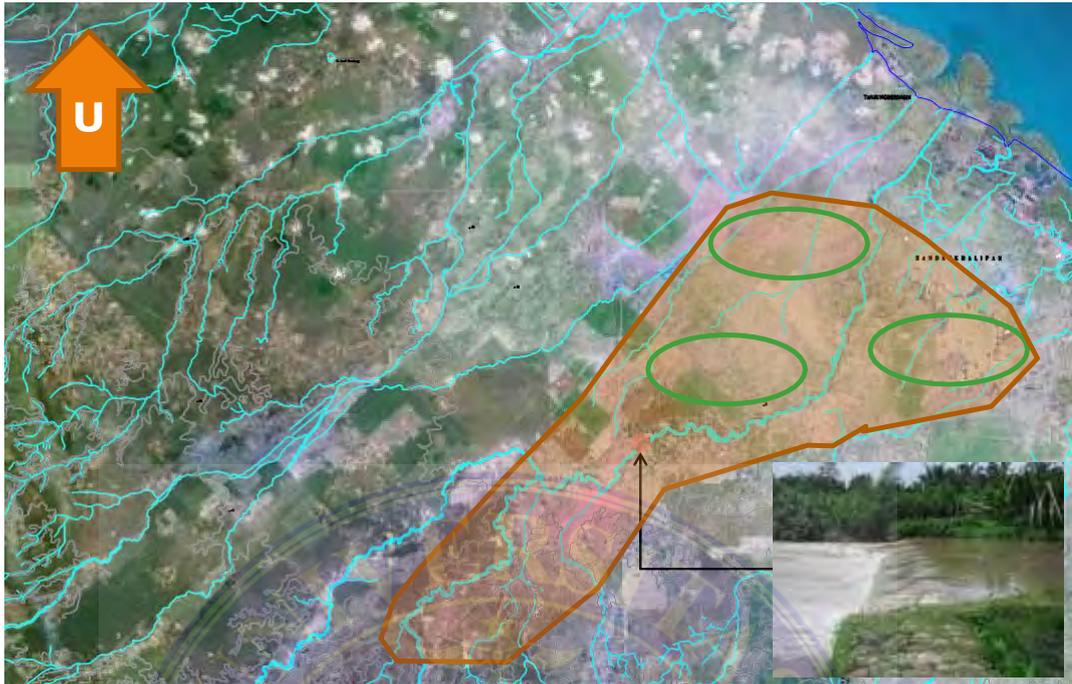
## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 Lokasi Penelitian

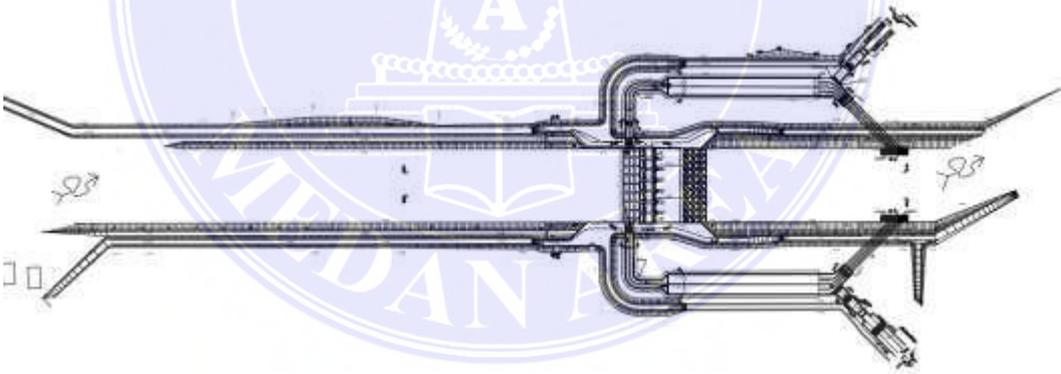
Penelitian ini dilakukan di Proyek Pembangunan Bendung Sei Padang dengan perusahaan kontraktor PT. Brantas Abipraya (Persero). Lokasi pekerjaan Bendung D.I Bajayu terletak di Kabupaten Serdang Bedagai, Kota Tebing Tinggi Provinsi Sumatera Utara. Lokasi pekerjaan ditunjukkan pada peta di berikut yang bersumber dari Balai Wilayah Sungai Sumatera II.



Gambar 3.1 Lokasi Tempat Penelitian  
Sumber : Data Proyek, 2019



Gambar 3.2 Lokasi cakupan bendung  
Sumber : Data Proyek, 2019

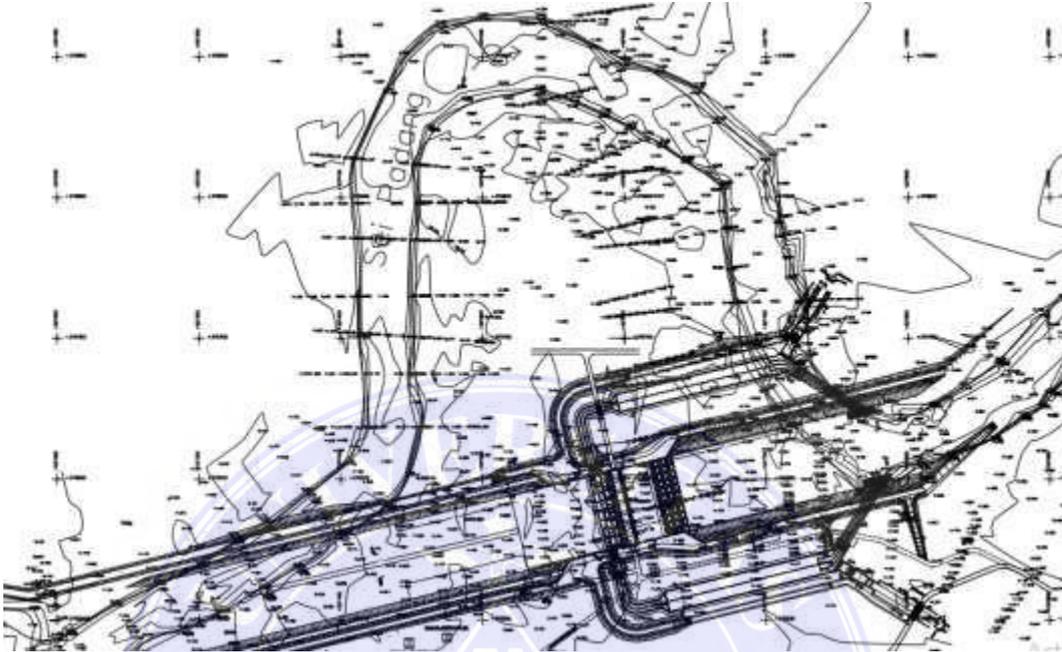


Gambar 3.3 Site Plan Pekerjaan  
Sumber : Data Proyek, 2019

### 3.2 Gambaran Kondisi Eksisting

Dalam penulisan penelitian ini, penulis menganalisis kondisi normal dan juga kondisi banjir. Kondisi eksisting dapat terlihat pada Gambar 3.3 dimana kondisi

tersebut merupakan rekayasa hidrologi yang menutup sebagian aliran sungai semula menjadi aliran baru sesuai dengan lokasi bendung rencana.



Gambar 3.4 Kondisi Eksisting  
Sumber : Data Proyek, 2019

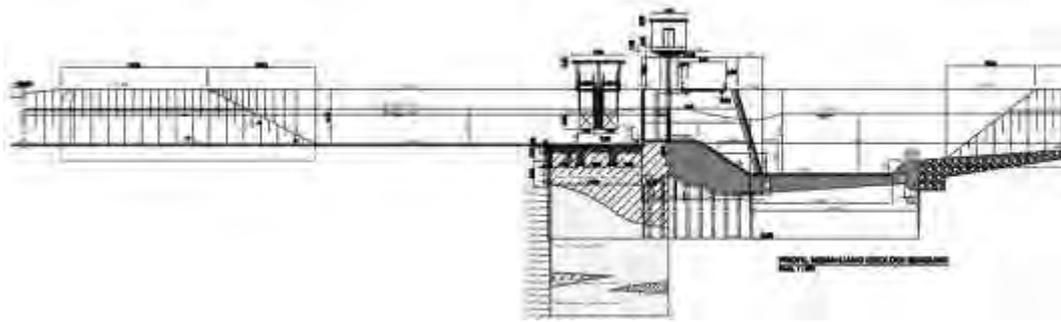
Keputusan dalam pemilihan lokasi bendung berpedoman pada alasan-alasan berikut:

1. lokasi bendung yang akan dibangun diusahakan sejauh mungkin kearah hulu agar bendung tidak terlalu tinggi, tetapi tidak terlalu panjang, dengan tidak melupakan panjang saluran primer yang diperlukan
2. lokasi bendung dipilih pada bagian sungai yang lurus dan sempit dimana penampang melintangnya relatif lebih konstan dan tepiannya stabil. Hal ini menjelaskan fakta bahwasanya sungai telah stabil pada kondisi dasarnya saat ini.

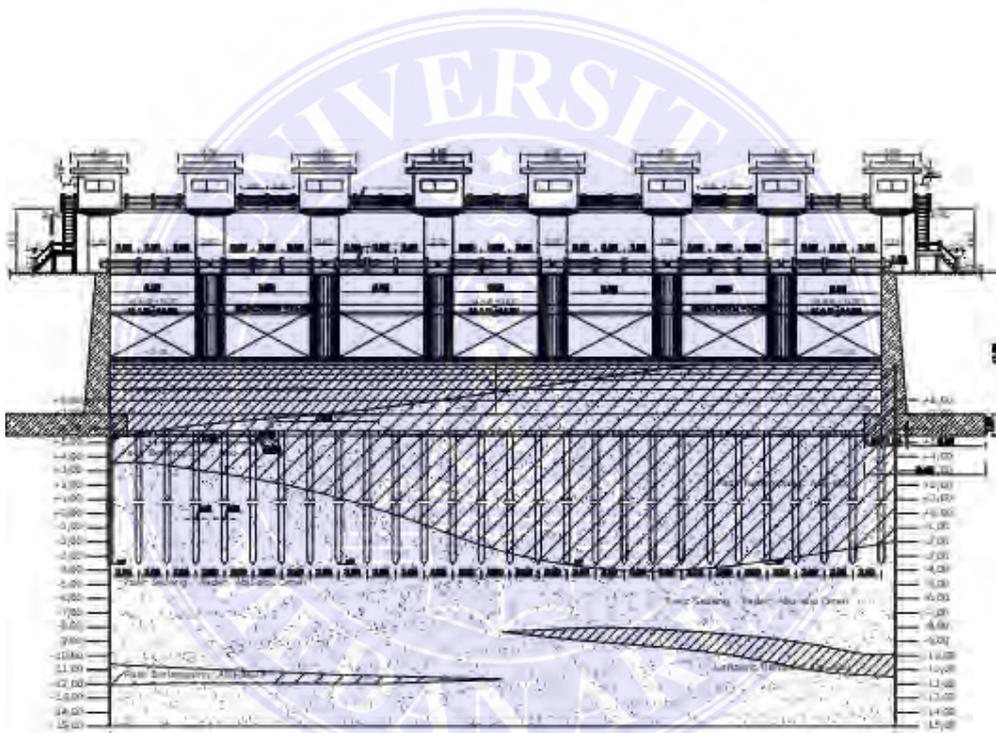
3. Kondisi geologi teknik, khususnya daya dukung tanah pondasi dan nilai lintasan air dibawah tanah (permeabilitas tanah), yang memiliki pengaruh besar terhadap stabilitas bangunan utama
4. Kondisi topografi, yang memiliki pengaruh signifikan terhadap pelaksanaan pekerjaan dan biaya pelaksanaan. Ruang yang cukup harus tersedia didasar sungai sebagai mengakomodasikan kompleks bangunan utama, struktur pengurusan, kantong lumpur dan struktur asupan saluran primer. Juga penting bahwa perbedaan antara jumlah penggalian dan jumlah timbunan yang relative tidak besar, konstruksi lebih mudah dan biaya lebih rendah.
5. Metode dalam pelaksanaan juga harus dipertimbangkan saat pemilihan lokasi bendung hal tersebut akan memiliki dampak yang signifikan terhadap kelancaran waktu pelaksanaan pekerjaan dan biaya yang akan dikeluarkan saat pelaksanaan. tetapi saat lokasi bendung ditentukan perlu diperhatikan kondisi eksisting yang mendukung tercapainya kestabilan bendung, setelah itulah baru dipilih metode pelaksanaan yang tepat dan bukan sebaliknya.

### 3.3 Detail Pekerjaan Bendung

Mercu bendung yang paling tepat digunakan untuk bendung gerak adalah mercu bendung ambang lembar karena di atas mercu ini akan dipasang pintu baja yang berfungsi mengatur muka air. Berikut Detai pekerjaan bendung yang akan dikerjakan.



Gambar 3.5 Detail Pekerjaan Mercu Bendung  
Sumber : Data Proyek, 2019



Gambar 3.6 Detail Pekerjaan Mercu Bendung  
Sumber : Data Proyek, 2019

### 3.4 Data Penelitian

Sumber data penelitian yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

#### 3.4.1 Data Primer

Data primer adalah data yang langsung diperoleh dari proyek sebagai data dasar penelitian dan dapat digunakan sebagai pengontrol data yang

terdapat pada data sekunder. Berikut merupakan data primer meliputi data yang diperoleh dari hasil survey wawancara dengan owner, kontraktor dan konsultan berupa kedalaman sungai, elevasi dasar sungai, lebar sungai, dll.

### 3.4.2 Data Sekunder

Data sekunder adalah data yang diperoleh berupa informasi dokumenter dan data-data lain yang berhubungan dengan proyek pembangunan Bendung Bajayu, seperti :

#### 3.4.2.1 Deskripsi Bangunan

1. Tipe bendung : Bendung bergerak
2. Tinggi mercu : 14.00 m
3. Panjang aliran balik :  $\pm 3$  Km
4. Lebar bendung : 54 m
5. Intake : Kiri dan kanan
6. Saluran penghubung : Kanan  $\pm 2$  Km, kiri  $\pm 2,5$  Km

#### 3.4.2.2 Desain Bangunan

Gambar desain bangunan terlampir.

#### 3.4.2.3 Data-data lain

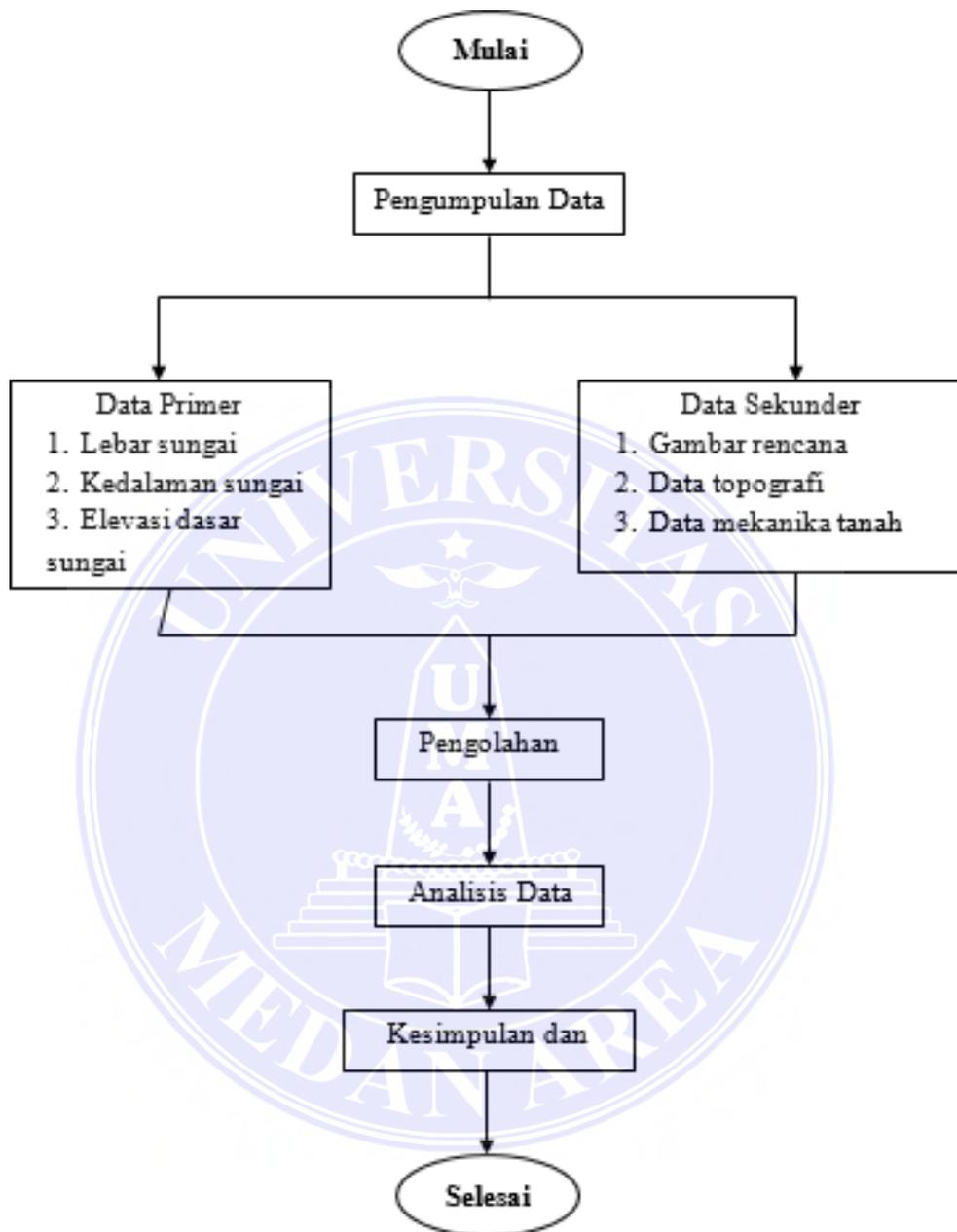
1. Data yang bersumber dari studi literature baik buku dan jurnal.
2. Data elevasi tanah/topografi
3. Data-data hasil uji laboratorium mekanika tanah

### 3.5 Metode Penelitian

Untuk kepentingan analisis dalam perencanaan Bendung DI. Bajayu, mengacu pada pedoman yang sudah ada yaitu Standar Perencanaan Irigasi (Kriteria Perencanaan) yang dikeluarkan oleh Direktorat Jenderal Pengairan . Adapun untuk melengkapi analisis untuk perhitungan yang lebih spesifik digunakan juga referensi-referensi lain yang biasa dipakai di Indonesia untuk perencanaan irigasi maupun perencanaan bendung dan bendung gerak pada khususnya. Jenis penelitian yang dilakukan pada skripsi ini adalah penelitian analisis deskriptif.



### 3.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.7 Kerangka berpikir  
Sumber : Analisis Peneliti, 2022

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Simpulan**

Dari perhitungan Bab IV untuk stabilitas Bendung D.I. Bajayu Tebing Tinggi, Kabupaten Serdang Bedagai Provinsi Sumatera Utara didapat hasil sebagai berikut:

1. Bendung D.I. Bajayu aman terhadap gaya geser saat kondisi normal dan banjir
2. Bendung D.I. Bajayu aman terhadap gaya guling saat kondisi normal dan banjir
3. Bendung D.I. Bajayu aman terhadap daya dukung tanah saat kondisi normal dan banjir

#### **5.2 Saran**

Berdasarkan analisis pengamatan dan analisis data penulisan menyampaikan beberapa saran:

1. Perlu dilakukan pemeliharaan terhadap area disekitar bendung
2. Inspeksi rutin harus dilakukan untuk memastikan bahwa setiap kerusakan pada bendung dapat ditangani dengan tepat dan cepat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Das, Braja. M., 1988 : *Mekanika Tanah*. Erlangga, Jakarta
- Departemen Pekerjaan Umum, Sub Direktorat Jenderal Pengairan, KP – 02. 1986,  
*Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan*,  
Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta.
- Departemen Pekerjaan Umum, Sub Direktorat Jenderal Pengairan, KP – 06.  
2009, *Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan Bagian  
Parameter Bangunan*, Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta.
- Richard, Vicky. 2013: *Perencanaan Bendung Untuk Daerah Irigasi Sulu*,  
Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Robydiansah, 2012: *Kajian Ulang Stabilitas Geser Dan Guling Parafet Di  
Sungai Grindulu Kabupaten Pacitan*, Universitas Negeri Yogyakarta.
- Sidharta, dkk. 1997: *Irigasi dan Bangunan Air*, Jakarta: Gunadarma.
- Soedibyo. 2013, *Teknik Bendungan*, Jakarta: PT. Sentra Sarana Abadi.