

**STUDI PERBANDINGAN STABILITAS TUBUH BENDUNG
DENGAN MATERIAL INTI *GEOMEMBRANE*
MENGUNAKAN APLIKASI GEOSTUDIO**

SKRIPSI

OLEH:

**UNICOLAS SATRIA OKTAVIANUS NAINGGOLAN
218110054**



**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 13/12/23

Access From (repository.uma.ac.id)13/12/23

**STUDI PERBANDINGAN STABILITAS TUBUH BENDUNG
DENGAN MATERIAL INTI *GEOMEMBRANE*
MENGUNAKAN APLIKASI GEOSTUDIO**

SKRIPSI

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh
Gelar Sarjana di Fakultas Teknik
Universitas Medan Area

Oleh:
UNICOLAS SATRIA OKTAVIANUS NAINGGOLAN
218110054
2023



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

UNIVERSITAS MEDAN AREA

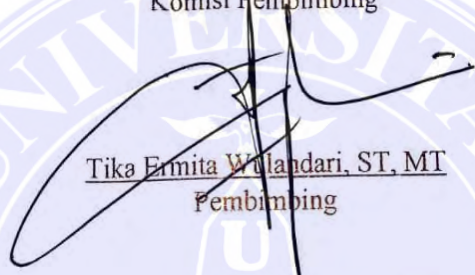
© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

HALAMAN PENGESAHAN

Judul Skripsi : Studi Perbandingan Stabilitas Tubuh Bendung dengan Material Inti *Geomembrane* menggunakan Aplikasi GeoStudio
Nama : Unicolas Satria Oktavianus Nainggolan
NPM : 218110054
Fakultas : Teknik

Disetujui Oleh:

Komisi Pembimbing


Tika Ermita Wulandari, ST, MT
Pembimbing


Dr. Rahmat Syah, S.Kom, M.Engg
Dekan


Tika Ermita Wulandari, ST, MT
Ka. Program Studi

Tanggal Lulus : 02 Agustus 2023

HALAMAN PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya susun, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana merupakan hasil karya tulis sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah. Saya bersedia menerima saksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan saksi-sanksi lainnya dengan peraturan yang berlaku, apabila di kemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.



Unicolas Satria Oktavianus Nainggolan
218110054



HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Unicolas Satria Oktavianus Nainggolan
NPM : 218110054
Program Studi : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tugas Akhir/Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui memberikan kepada Universitas Medan Area **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya saya yang berjudul Analisa Stabilitas Tubuh Bendung Sei Simeme Deli Serdang Dengan Menggunakan Aplikasi GeoStudio. Beserta Perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database) merawat dan mempublikasikan tugas akhir/skripsi/tesis 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 : 02 Agustus 2023
Yang Menyatakan


(Unicolas Satria Oktavianus
Nainggolan)

RIWAYAT HIDUP

Penulis lahir di Sidikalang pada tanggal 01 Oktober 1998 dari Ayah Parulian Nainggolan dan Ibu Masti Malau. Penulis merupakan putra ke 1 dari 4 bersaudara. Tahun 2016 Penulis lulus dari SMA Swasta Cahaya Medan dan pada tahun 2021 terdaftar sebagai Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Medan Area. Selama mengikuti perkuliahan penulis aktif mengikuti perkuliahan dengan baik.



KATA PENGHANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan yang maha kuasa atas segala karunia-Nya sehingga Skripsi ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam skripsi ini ialah stabilitas dan material penyusun tubuh bendung dengan judul Studi Perbandingan Stabilitas Tubuh Bendung Dengan Material Inti *Geomembrane* Menggunakan Aplikasi GeoStudio. Terima kasih penulis sampaikan kepada Ibu Tika Ermita Wulandari, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing dan juga selaku Ka. Prodi Teknik Sipil Universitas Medan Area yang telah banyak memberikan saran. Disamping itu penghargaan penulis sampaikan kepada Ibu Yunike Wulandari, S.T., M.T. dan PT.Mettana, KSO yang telah banyak membantu penulis selama penyusunan skripsi terutama dalam hal pengumpulan data penelitian. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada ayah Bapak Parulian Nainggolan dan mama Ibu Masti Malau serta seluruh keluarga atas segala doa dan perhatiannya. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu, kritik dan saran sangat penulis harapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi kalangan akademik maupun masyarakat. Akhir kata penulis ucapkan terima kasih.

Penulis

(Unicolas Satria Oktavianus Nainggolan)

ABSTRAK

Ketersediaan material timbunan maupun kualitas material menjadi salah satu masalah dalam perencanaan sebuah bendungan terutama material inti bendungan yang harus kedap air. Desain bendungan harus aman terhadap rembesan maupun longsor. Dengan aplikasi GeoStudio bendungan akan dimodelkan untuk mengamati stabilitas tubuh bendung terutama terhadap longsor dan rembesan. Pemodelan I dimodelkan dengan material zona inti menggunakan material lempung *borrow area* hulu dan pemodelan II menggunakan material inti lempung *borrow area* hilir. Pemodelan III dan IV menggunakan material inti yang sama dengan penambahan lapisan material *geomembrane* antara zona *transisi* dan *filter* hulu. *Geomembrane* ditambahkan untuk mengamati pengaruh penggunaan terhadap stabilitas tubuh bendung. Tubuh bendung dianalisa pada kondisi saat tubuh bendung selesai dibangun, kondisi muka air banjir, kondisi muka air normal, kondisi muka air rendah dan kondisi saat terjadi penurunan muka air tiba-tiba. Pemodelan III dengan material lempung *borrow area* hulu dan dilapisi *geomembrane* antara zona *transisi* dan *filter* hulu merupakan desain dengan stabilitas yang paling baik dengan angka keamanan longsor paling kritis yaitu 2.459 pada hilir bendung pada kondisi muka air banjir. Debit rembesan pada hilir bendung yaitu $0.0017 \text{ m}^3/\text{dt}/\text{m}$ dan debit rembesan maksimum yaitu $0.0026 \text{ m}^3/\text{dt}/\text{m}$ pada kondisi muka air banjir.

Kata Kunci : *Geomembrane*. Longsor, Rembesan, Stabilitas

ABSTRACT

The availability of embankment material and the quality of the material is one of the problems in planning a dam, especially the dam core material which must be watertight. The dam design must be safe against seepage and landslides. With the GeoStudio application, the dam will be modeled to observe the stability of the dam body, especially against landslides and seepage. Modeling I is modeled with core zone material using upstream borrow clay material and modeling II using downstream borrow clay core material. Modeling III and IV used the same core material with the addition of a layer of geomembrane material between the transition zone and the upstream filter. The geomembrane was added to observe the effect of use on the stability of the weir body. The weir body was analyzed under conditions when the weir body was completed, flood water level conditions, normal water level conditions, low water level conditions and conditions when there was a sudden drop in water level. Modeling III with upstream borrow clay material and geomembrane between the transition zone and upstream filter is the design with the best stability with the most critical avalanche safety number of 2.459 downstream of the weir under flood water level conditions. The seepage discharge downstream of the weir is $0.0017 \text{ m}^3/\text{dt}/\text{m}$ and the maximum seepage discharge is $0.0026 \text{ m}^3/\text{dt}/\text{m}$ under flood water level conditions.

Keywords: *Geomembrane, Seepage, Slope, Stability*

DAFTAR ISI

	Halaman
COVER	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI	v
RIWAYAT HIDUP	vi
KATA PENGHANTAR.....	vii
ABSTRAK.....	viii
<i>ABSTRACT</i>	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BABI PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BABII TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Penelitian Terdahulu	6
2.1.1 Studi Analisis Dimensi dan Stabilitas Tubuh Bendungan Urugan Beringin Sila	6
2.1.2 Analisis Stabilitas Lereng Pada Bendungan Titab	7
2.1.3 Studi Perbandingan Desain Inti Bendung Dengan Pemakaian Material Alternatif Untuk Optimasi Biaya.....	8
2.2 Pengertian Bendungan	9
2.3 Klasifikasi Bendungan Urugan	10
2.4 Dimensi Bendungan Urugan	11
2.4.1 Tinggi Bendungan (H)	11

2.4.2	Tinggi Jagaan (H_f)	12
2.4.3	Lebar mercu (b).....	13
2.4.4	Panjang Bendungan	13
2.4.5	Kemiringan Lereng Bendungan	13
2.5	Gaya dan beban yang bekerja pada bendungan	14
2.5.1	Beban berat tubuh bendungan.....	14
2.5.2	Beban hidrostatis.....	15
2.5.3	Tekanan air pori	15
2.6	Material Timbunan.....	17
2.6.1	Material Tanah	18
2.6.2	Material Pasir dan Kerikil.....	29
2.6.3	Material Batu	30
2.6.4	Material Campuran	31
2.6.5	Material <i>Random</i>	31
2.6.6	<i>Geomembrane</i>	32
2.7	Persyaratan Material Timbunan	36
2.7.1.	Zona Kedap Air.....	36
2.7.2.	Zona <i>Filter</i> dan Transisi.....	39
2.7.3.	Zona Batu.....	40
2.7.4.	Zona <i>Random</i>	41
2.8	Stabilitas Bendungan.....	41
2.8.1	Stabilitas Bendungan Terhadap Longsoran	41
2.8.2	Stabilitas Bendungan Terhadap Aliran Infiltrasi.....	43
2.9	Aplikasi GeoStudio	47
2.9.1	<i>Slope/w</i>	48
2.9.2	<i>Seep/w</i>	50
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		54
3.1	Lokasi Penelitian.....	54
3.2	Gambaran Proyek.....	55
3.3	Pengumpulan Data	58
3.4	Analisa dan Perhitungan	59

3.5	Diagram Alur Pekerjaan.....	62
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	63
4.1	Pengolahan Data.....	63
4.1.1	Koordinat Tubuh Bendung	63
4.1.2	Material Penyusun Tubuh Bendung.....	65
4.1.3	Elevasi Muka Air	67
4.2	Desain Pemodelan Tubuh Bendung.....	68
4.2.1	Desain Pemodelan I	68
4.2.2	Desain Pemodelan II	69
4.2.3	Desain Pemodelan III.....	70
4.2.4	Desain Pemodelan IV	70
4.3	Menginput dan mendefinisikan pemodelan pada GeoStudio...	71
4.4	Hasil <i>Running Analysis</i>	85
4.4.1	Pemodelan I	85
4.4.2	Pemodelan II	92
4.4.3	Pemodelan III.....	99
4.4.4	Pemodelan IV.....	106
4.5	Pembahasan	113
BAB V	SIMPULAN DAN SARAN.....	120
5.1	Kesimpulan.....	120
5.2	Saran	121
DAFTAR PUSTAKA	xix
LAMPIRAN	xxi

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Pembagian Jenis Tanah Berdasarkan Ukuran Butir (Darwis, 2018).....	20
Tabel 2. Sistem Klasifikasi Tanah USCS (Bowles, 1986).....	21
Tabel 3. Jenis Batuan yang Cocok untuk Bendungan (Affandi, 2014).....	30
Tabel 4. Spesifikasi untuk Bahan Cetakan dan Ekstruksi Plastik Polietilena dan ASTM D883-96 Terminologi Standar yang Berkaitan dengan Plastik (Müller, 2007).....	33
Tabel 5. Standar dan persyaratan material <i>geomembrane</i> HDPE (Müller, 2007).....	33
Tabel 6. Batasan Kh/Kv Pada Bendungan (Victor Dkk, 2022).....	36
Tabel 7. Kriteria Penerimaan Rembesan Pada Tubuh Bendung (Victor Dkk, 2022).....	36
Tabel 8. <i>Equations of statics satisfied for each method (Seequent Limited, 2023)</i>	48
Tabel 9. <i>Intercolumn force characteristic and relationships (Seequent Limited, 2023)</i>	49
Tabel 10. Data Inputan Material Tubuh Bendung Dalam Aplikasi.....	59
Tabel 11. Koordinat Tubuh Bendung (Analisis Peneliti, 2023).....	63
Tabel 12. Data Material Timbunan Zona I dan Zona II (Data Penelitian, 2023).....	66
Tabel 13. Data Material Timbunan Zona 3 dan Zona 4a (Data Penelitian, 2023).....	67
Tabel 14. Data Material Timbunan Zona 4b dan Zona 5 (Data Penelitian, 2023).....	67
Tabel 15. <i>Boundary condition</i> (Data Penelitian, 2023).....	68
Tabel 16. Detail Material Timbunan Pemodelan I (Data Penelitian, 2023).....	69
Tabel 17. Detail Material Timbunan Pemodelan II (Data Penelitian, 2023).....	69
Tabel 18. Detail Material Timbunan Pemodelan III (Data Penelitian 2023).....	70
Tabel 19. Detail Material Timbunan Pemodelan IV (Data Penelitian, 2023)...	71
Tabel 20. Faktor Keamanan Longsor Hulu Kondisi Penurunan Muka Air Tiba-Tiba Muka Air Normal – Muka Air Rendah (Analisis Peneliti, 2023).....	90
Tabel 21. Angka Keamanan Longsor Pada Setiap Kondisi Pemodelan I (Analisis Peneliti, 2023).....	91
Tabel 22. Debit Rembesan Maksimum Pada Setiap Kondisi Pemodelan I (Analisis Peneliti, 2023).....	91
Tabel 23. Debit Rembesan Maksimum Pada Setiap Kondisi Pemodelan I (Analisis Peneliti, 2023).....	91

Tabel 24. Faktor Keamanan Longsoran Hilir Kondisi Penurunan Muka Air Tiba-Tiba Muka Air Normal-Muka Air Rendah (Analisis Peneliti, 2023).....	97
Tabel 25. Angka Keamanan Longsoran Pada Setiap Kondisi Pemodelan II (Analisis Peneliti, 2023).....	98
Tabel 26. Debit Rembesan Hilir Pada Setiap Kondisi Pemodelan II (Analisis Peneliti, 2023)	98
Tabel 27. Debit Rembesan Maksimum Pada Setiap Kondisi Pemodelan II (Analisis Peneliti, 2023)	98
Tabel 28. Faktor Keamanan Longsoran Hulu Kondisi Penurunan Muka Air Tiba-Tiba Muka Air Normal-Muka Air Rendah (GeoStudio, 2023).....	104
Tabel 29. Angka Keamanan Longsoran Pada Setiap Kondisi Pemodelan III (Analisis Peneliti, 2023).....	105
Tabel 30. Debit Rembesan Hilir Pada Setiap Kondisi Pemodelan III (Analisis Peneliti, 2023)	105
Tabel 31. Debit Rembesan Hilir Pada Setiap Kondisi Pemodelan III (Analisis Peneliti, 2023)	105
Tabel 32. Faktor Keamanan Longsoran Hulu Kondisi Penurunan Muka Air Tiba-Tiba Muka Air Normal-Muka Air Rendah (Analisis Peneliti, 2023).....	111
Tabel 33. Angka Keamanan Longsoran Pada Setiap Kondisi Pemodelan III (Analisis Peneliti, 2023).....	112
Tabel 34. Debit Rembesan Maksimum Pada Setiap Kondisi Pemodelan IV (Analisis Peneliti, 2023)	112
Tabel 35. Debit Rembesan Maksimum Pada Setiap Kondisi Pemodelan IV (Analisis Peneliti, 2023)	112
Tabel 36. Rangkuman hasil analisa longsoran dan rembesan tubuh bendung (Analisis Peneliti, 2023)	113

DAFTAR GAMBAR

Halaman.

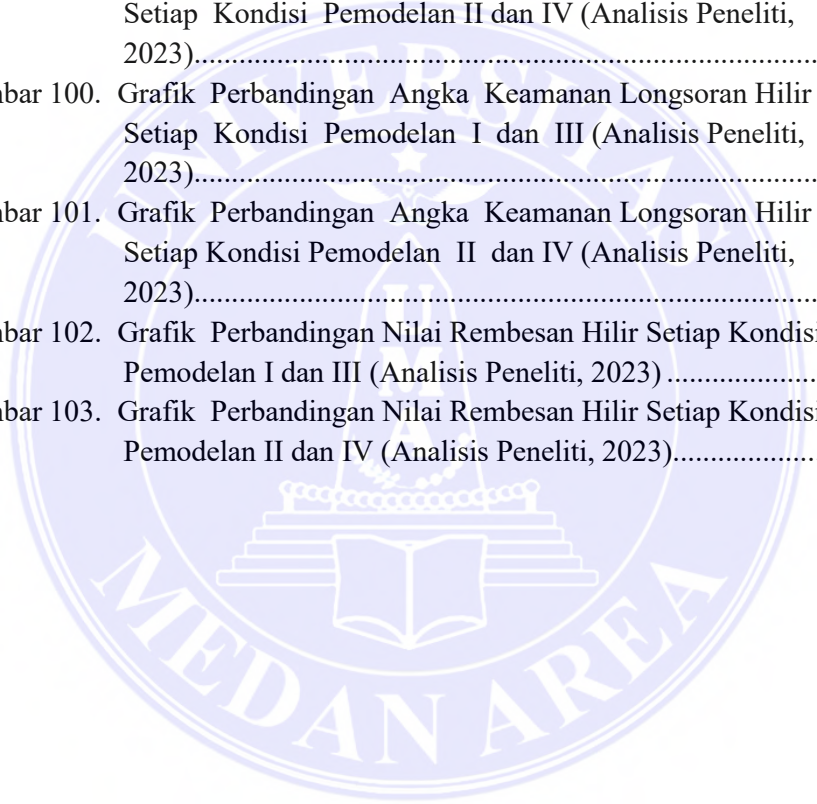
Gambar 1.	Klasifikasi Umum Bendungan Urugan (Soediby, 1993)	10
Gambar 2.	Istilah untuk bendungan urugan (Sosrodarsono and Takeda, 2002).....	11
Gambar 3.	Kondisi-kondisi perhitungan beban berat tubuh bendungan (Sosrodarsono & Takeda, 2002).....	15
Gambar 4.	Kriteria Klasifikasi Sistem USCS (Das, 1995)	22
Gambar 5.	Diagram Fase Tanah (Darwis, 2018)	23
Gambar 6.	Alat Uji Kuat Geser Langsung (Das, 1995)	25
Gambar 7.	Sampel silinder untuk pengujian kuat geser tanah (Darwis, 2018).....	27
Gambar 8.	Lingkaran Mohr (Darwis, 2018)	27
Gambar 9.	Lingkaran Mohr Coulumb (Darwis, 2018)	29
Gambar 10.	Kriteria keruntuhan Mohr-Coulumb <i>Pole Method</i> (Darwis, 2018).....	29
Gambar 11.	Material <i>Geomembrane</i> pada timbunan (Müller, 2007).....	32
Gambar 12.	Diagram skematik sistem pelapis untuk <i>geomembrane</i> (Müller, 2007).....	35
Gambar 13.	Ilustrasi Pemasangan <i>Geomembrane</i> pada Timbunan (Müller, 2007).....	35
Gambar 14.	Jaringan Trayektori ((Sosrodarsono & Takeda, 2002))	45
Gambar 15.	Gaya yang bekerja padang bidang irisan (<i>Seequent Limited, 2023</i>).....	49
Gambar 16.	<i>Volumetric water content functions</i> ((Sinarta, 2016)	52
Gambar 17.	<i>Soil-water characteristic curve for sandy soil</i> (Sinarta, 2016).....	53
Gambar 18.	Lokasi Bendungan Lau Simeme (Google Earth, 2023)	54
Gambar 19.	Peta Lokasi Administratif Bendungan Lau Simeme (BWS Sumatera II, 2023).....	55
Gambar 20.	<i>Site Plan</i> Bendungan Lau Simeme (BWS Sumatera II, 2023).....	56
Gambar 21.	Potongan Melintang Tubuh Bendungan (BWS Sumatera II, 2023).....	57
Gambar 22.	Potongan Memanjang Tubuh Bendungan (BWS Sumatera II, 2023)	57
Gambar 23.	Informasi Material Timbunan Bendungan (BWS Sumatera II, 2023)	57
Gambar 24.	Kerangka Berpikir (Peneliti, 2023)	62
Gambar 25.	Pemodelan I (GeoStudio, 2023)	69
Gambar 26.	Pemodelan II (GeoStudio, 2023).....	69

Gambar 27.	Pemodelan III (GeoStudio, 2023)	70
Gambar 28.	Pemodelan IV (GeoStudio, 2023)	71
Gambar 29.	Geometri Tubuh Bendungan (GeoStudio, 2023)	72
Gambar 30.	<i>Draw Materials</i> (GeoStudio, 2023)	73
Gambar 31.	Tampilan Material Penyusun Tubuh Bendung (Geostudio, 2023).....	74
Gambar 32.	Pendefinisian longsor (GeoStudio, 2023).....	75
Gambar 33.	Penfedenisian arah rembesan (GeoStudio, 2023)	78
Gambar 34.	Profil longsor pasca konstruksi Hilir (GeoStudio, 2023).....	85
Gambar 35.	Profil longsor pasca konstruksi Hulu (GeoStudio, 2023)	85
Gambar 36.	Profil Rembesan Kondisi Muka Air Banjir MAB (GeoStudio, 2023).....	86
Gambar 37.	Profil Longsor Kondisi Muka Air Banjir Hilir (GeoStudio, 2023).....	86
Gambar 38.	Profil Longsor Kondisi Muka Air Banjir Hulu (GeoStudio, 2023).....	86
Gambar 39.	Profil rembesan Kondisi Muka Air Normal (GeoStudio, 2023)..	87
Gambar 40.	Profil Longsor Hilir Kondisi Muka Air Normal (GeoStudio, 2023).....	87
Gambar 41.	Profil Longsor Hulu Kondisi Muka Air Normal (GeoStudio, 2023).....	87
Gambar 42.	Profil Rembesan Kondisi Muka Air Rendah (GeoStudio, 2023).....	88
Gambar 43.	Profil Longsor Hilir Kondisi Muka Air Rendah (GeoStudio, 2023).....	88
Gambar 44.	Profil Longsor Hulu Kondisi Muka Air Rendah (GeoStudio, 2023).....	88
Gambar 45.	Profil Rembesan kondisi penurunan muka air tiba-tiba Muka Air Normal – Muka Air Rendah (GeoStudio, 2023).....	89
Gambar 46.	Profil rembesan kondisi penurunan muka air tiba-tiba 30 hari dari elevasi muka air normal-elevasi muka air rendah (GeoStudio, 2023)	89
Gambar 47.	Profil longsor hilir pada kondisi penurunan muka air tiba-tiba hari ke-30 dari elevasi muka air normal - muka air rendah (GeoStudio, 2023)	89
Gambar 48.	Profil longsor hulu pada kondisi penurunan muka air tiba-tiba hari ke-30 dari elevasi muka air normal - muka air rendah (GeoStudio, 2023)	90
Gambar 49.	<i>Safety factor vs time</i> (GeoStudio, 2023).....	90
Gambar 50.	Profil longsor pasca konstruksi hilir (GeoStudio, 2023).....	92
Gambar 51.	Profil longsor pasca konstruksi hulu (GeoStudio, 2023).....	92

Gambar 52.	Profil Rembesan Kondisi Muka Air Banjir MAB (GeoStudio, 2023).....	93
Gambar 53.	Profil Longsoran Kondisi Muka Air Banjir Hilir (GeoStudio, 2023).....	93
Gambar 54.	Profil Longsoran Kondisi Muka Air Banjir Hulu (GeoStudio, 2023).....	93
Gambar 55.	Profil rembesan Kondisi Muka Air Normal (GeoStudio, 2023)..	94
Gambar 56.	Profil Longsoran Hilir Kondisi Muka Air Normal (GeoStudio, 2023).....	94
Gambar 57.	Profil Longsoran Hulu Kondisi Muka Air Normal (GeoStudio, 2023).....	94
Gambar 58.	Profil Rembesan Kondisi Muka Air Rendah (GeoStudio, 2023).....	95
Gambar 59.	Profil Longsoran Hilir Kondisi Muka Air Rendah (GeoStudio, 2023).....	95
Gambar 60.	Profil Longsoran Hulu Kondisi Muka Air Rendah (GeoStudio, 2023).....	95
Gambar 61.	Profil Rembesan kondisi penurunan muka air tiba-tiba Muka Air Normal – Muka Air Rendah (GeoStudio, 2023).....	96
Gambar 62.	Profil rembesan kondisi penurunan muka air tiba-tiba 30 hari dari elevasi muka air normal-elevasi muka air rendah (GeoStudio, 2023)	96
Gambar 63.	Profil longsoran hilir pada kondisi penurunan muka air tiba-tiba hari ke-30 dari elevasi muka air normal - muka air rendah (GeoStudio, 2023)	96
Gambar 64.	Profil longsoran hulu pada kondisi penurunan muka air tiba-tiba hari ke-30 dari elevasi muka air normal - muka air rendah (GeoStudio, 2023)	97
Gambar 65.	<i>Safety factor vs time (GeoStudio, 2023)</i>	97
Gambar 66.	Profil longsoran pasca konstruksi hilir (GeoStudio, 2023)....	99
Gambar 67.	Profil longsoran pasca konstruksi hulu (GeoStudio, 2023) ...	99
Gambar 68.	Profil Rembesan Kondisi Muka Air Banjir MAB (GeoStudio, 2023).....	100
Gambar 69.	Profil Longsoran Kondisi Muka Air Banjir Hilir (GeoStudio, 2023).....	100
Gambar 70.	Profil Longsoran Kondisi Muka Air Banjir Hulu (GeoStudio, 2023).....	100
Gambar 71.	Profil rembesan Kondisi Muka Air Normal (GeoStudio, 2023)....	101
Gambar 72.	Profil Longsoran Hilir Kondisi Muka Air Normal (GeoStudio, 2023).....	101

Gambar 73.	Profil Longsor Hulu Kondisi Muka Air Normal (GeoStudio, 2023)	101
Gambar 74.	Profil Rembesan Kondisi Muka Air Rendah (GeoStudio,2023)	102
Gambar 75.	Profil Longsor Hilir Kondisi Muka Air Rendah (GeoStudio, 2023)	102
Gambar 76.	Profil Longsor Hulu Kondisi Muka Air Rendah (GeoStudio, 2023)	102
Gambar 77.	Profil Rembesan kondisi penurunan muka air tiba-tiba Muka Air Normal –Muka Air Rendah (GeoStudio, 2023)..	103
Gambar 78.	Profil rembesan kondisi penurunan muka air tiba-tiba 30 hari dari elevasi muka air normal-elevasi muka air rendah (GeoStudio, 2023)	103
Gambar 79.	Profil longsor hilir pada kondisi penurunan muka air tiba-tiba hari ke-30 dari elevasi muka air normal - muka air rendah (GeoStudio, 2023)	103
Gambar 80.	Profil longsor hulu pada kondisi penurunan muka air tiba-tiba hari ke-30 dari elevasi muka air normal - muka air rendah (GeoStudio, 2023)	104
Gambar 81.	<i>Safety factor vs time</i> (GeoStudio, 2023).....	104
Gambar 82.	Profil longsor pasca konstruksi Hilir (GeoStudio, 2023).....	106
Gambar 83.	Profil longsor pasca konstruksi Hulu (GeoStudio, 2023)	106
Gambar 84.	Profil Rembesan Kondisi Muka Air Banjir MAB (GeoStudio, 2023)	107
Gambar 85.	Profil Longsor Kondisi Muka Air Banjir Hilir (GeoStudio, 2023)	107
Gambar 86.	Profil Longsor Kondisi Muka Air Banjir Hulu (GeoStudio, 2023)	107
Gambar 87.	Profil rembesan Kondisi Muka Air Normal (GeoStudio,2023)....	108
Gambar 88.	Profil Longsor Hilir Kondisi Muka Air Normal (GeoStudio, 2023)	108
Gambar 89.	Profil Longsor Hulu Kondisi Muka Air Normal (GeoStudio, 2023)	108
Gambar 90.	Profil Rembesan Kondisi Muka Air Rendah (GeoStudio,2023)	109
Gambar 91.	Profil Longsor Hilir Kondisi Muka Air Rendah (GeoStudio, 2023)	109
Gambar 92.	Profil Longsor Hulu Kondisi Muka Air Rendah (GeoStudio, 2023)	109
Gambar 93.	Profil Rembesan kondisi penurunan muka air tiba-tiba Muka Air Normal – Muka Air Rendah (GeoStudio,2023)	110
Gambar 94.	Profil rembesan kondisi penurunan muka air tiba-tiba 30 hari dari elevasi muka air normal-elevasi muka air rendah (GeoStudio, 2023)	110

Gambar 95.	Profil longsoran hilir pada kondisi penurunan muka air tiba-tiba hari ke-30 dari elevasi muka air normal - muka air rendah (GeoStudio, 2023)	110
Gambar 96.	Profil longsoran hulu pada kondisi penurunan muka air tiba-tiba hari ke-30 dari elevasi muka air normal - muka air rendah (GeoStudio, 2023)	111
Gambar 97.	<i>Safety factor vs time</i> (GeoStudio, 2023).....	111
Gambar 98.	Grafik Perbandingan Angka Keamanan Longsoran Hulu Setiap Kondisi Pemodelan I dan III (Analisis Peneliti, 2023).....	114
Gambar 99.	Grafik Perbandingan Angka Keamanan Longsoran Hulu Setiap Kondisi Pemodelan II dan IV (Analisis Peneliti, 2023).....	115
Gambar 100.	Grafik Perbandingan Angka Keamanan Longsoran Hilir Setiap Kondisi Pemodelan I dan III (Analisis Peneliti, 2023).....	115
Gambar 101.	Grafik Perbandingan Angka Keamanan Longsoran Hilir Setiap Kondisi Pemodelan II dan IV (Analisis Peneliti, 2023).....	116
Gambar 102.	Grafik Perbandingan Nilai Rembesan Hilir Setiap Kondisi Pemodelan I dan III (Analisis Peneliti, 2023)	116
Gambar 103.	Grafik Perbandingan Nilai Rembesan Hilir Setiap Kondisi Pemodelan II dan IV (Analisis Peneliti, 2023).....	117



DAFTAR LAMPIRAN

Halaman.

Lampiran 1. Gambar Potongan Melintang Tubuh Bendung.....	xxi
Lampiran 2. Gambar Potongan Memanjang Tubuh Bendung	xxii



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bendungan Lau Simeme direncanakan dengan tipe bendungan urugan zonal. Bendungan ini terletak di Kecamatan Biru-biru, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara dengan kapasitas tampung rencana 21,07 juta m³. Bendungan Lau Simeme akan dimanfaatkan sebagai sumber irigasi lahan pertanian, penyediaan air baku, serta sebagai infrastruktur pengendali banjir di Kota Medan dan Kabupaten Deli Serdang.

Bendungan tipe urugan zonal merupakan bendungan dengan timbunan tubuh bendung yang terdiri dari batuan dengan susunan ukuran butir yang berbeda-beda dalam tiap pelapisan tertentu. Material timbunan terdiri dari material kedap air dan material lulus air. Material lulus air berfungsi untuk mendukung stabilitas tubuh bendung seperti pasir, kerikil dan batu. Material kedap air berfungsi untuk mencegah rembesan air dari waduk umumnya berupa tanah lempungan. Material timbunan yang digunakan umumnya didapatkan dari sekitar bendungan melalui proses penggalian, pengangkutan, penimbunan dan pemadatan.

Material tubuh bendungan yang direncanakan harus ekonomis namun juga aman terhadap kemungkinan kegagalan struktur terutama kemungkinan terjadinya longsor dan rembesan. Material tubuh bendungan harus memperhatikan : kualitas dan kuantitas material yang terdapat disekitar bendungan, jarak pengangkutan dari daerah penggalian ke tempat penimbunan. Ketersediaan material timbunan maupun kualitas material menjadi salah satu masalah dalam perencanaan sebuah bendungan terutama material inti bangunan berupa lempungan yang harus kedap air dan sesuai

dengan spesifikasi teknis yang ditentukan. Material inti untuk tubuh bendung pada proyek Bendungan Lau Simeme masih dalam tahap eksplorasi dan pengujian. Berdasarkan data yang ada, terdapat dua material rencana yang sudah diuji di laboratorium yaitu material *clay borrow area* hulu bendungan dan material *clay borrow area* hilir bendungan. Studi untuk mempelajari penggunaan material sekitar bendungan untuk digunakan sebagai material inti kedepannya perlu dilakukan untuk mendapatkan desain tubuh bendung dengan stabilitas yang paling baik terutama terhadap kemungkinan rembesan dan longsoran yang terjadi akibat berbagai kondisi pembebanan.

Geomembrane merupakan terbuat dari lembaran-lembaran polimer tipis, susunan polimer *geomembrane* relatif sulit ditembus dibandingkan dengan geotekstil ataupun tanah, bahkan dibandingkan material inti bendungan umumnya. *Geomembrane* berfungsi sebagai material atau sebagai penghalang merembesnya air. Material *geomembrane* dimodelkan sebagai bagian material inti bendungan dan pelapis luar dengan material lolos air lainnya.

Penggunaan material *geomembrane* dan dikombinasikan menggunakan material *borrow area* perlu dipelajari sebagai alternatif desain untuk mengetahui pengaruh penggunaan material *geomembrane* terhadap stabilitas tubuh bendung terutama terhadap rembesan. Desain tubuh bendung dengan material *geomembrane* dianalisa sesuai standar perencanaan desain bendungan dan dibandingkan hasilnya dengan desain menggunakan material yang ada. Desain alternatif akan dimodelkan menggunakan aplikasi GeoStudio untuk menganalisa rembesan maupun longsoran yang terjadi dengan material alternatif penggunaan lapisan *geomembrane*. Hasil analisa berupa angka keamanan (*safety factor*) dan debit rembesan yang terjadi pada

hilir tubuh bendung digunakan sebagai studi perbandingan desain alternatif dengan desain dengan material yang ada. Studi perbandingan stabilitas tubuh bendung dengan material inti *geomembrane* dengan menggunakan aplikasi GeoStudio perlu dilakukan untuk mendapatkan pengaruh penggunaan material *geofabricated* dalam konstruksi bendung sebagai alternatif pemilihan material namun aman terhadap kemungkinan kegagalan yang terjadi.

1.2 Rumusan Masalah

1. Berapa nilai *Safety Factor (SF)* stabilitas terhadap longsor pada setiap desain pemodelan tubuh bendung menggunakan aplikasi GeoStudio ?
2. Berapa debit rembesan yang terjadi pada setiap desain pemodelan tubuh bendung menggunakan aplikasi GeoStudio ?
3. Bagaimana hasil perbandingan *Safety Factor (SF)* stabilitas terhadap longsor pada setiap desain pemodelan tubuh bendung menggunakan aplikasi GeoStudio ?
4. Bagaimana hasil perbandingan debit rembesan yang terjadi pada desain tubuh pada setiap pemodelan menggunakan aplikasi GeoStudio ?

1.3 Batasan Masalah

1. Tugas Akhir ini hanya membahas analisa stabilitas tubuh bendungan terhadap longsor dan rembesan pada setiap desain pemodelan.
2. Tugas Akhir ini tidak membahas stabilitas pondasi bendungan.
3. Tugas Akhir ini tidak membahas analisa stabilitas desain bendung terhadap gempa maupun kemungkinan adanya likuifaksi.

4. Analisa stabilitas pada penelitian ini menggunakan aplikasi GeoStudio.
5. Studi Kasus pada Tugas Akhir ini yaitu pada proyek Bendungan Lau Simeme.

1.4 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud penelitian adalah membandingkan stabilitas tubuh bendung dengan zona inti tanpa lapisan *geomembrane* dan dengan lapisan *geomembrane* terhadap rembesan dan longsoran pada setiap kondisi pembebanan sebagai suatu alternatif desain tubuh bendung dengan material alternatif.

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan yang ingin dicapai dari studi ini sebagai berikut :

1. Mendapatkan nilai *safety factor (sf)* stabilitas terhadap longsoran pada setiap desain pemodelan tubuh bendung menggunakan aplikasi GeoStudio.
2. Mendapatkan nilai debit rembesan pada setiap desain pemodelan tubuh bendung menggunakan aplikasi GeoStudio.
3. Membandingkan stabilitas setiap desain pemodelan tubuh bendung dengan longsoran.
4. Membandingkan debit rembesan pada setiap desain pemodelan tubuh bendung menggunakan material *geomembrane*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui bagaimana cara menganalisa stabilitas tubuh bendung menggunakan aplikasi GeoStudio.

2. Bahan referensi perencanaan suatu alternatif desain dengan material eksisting *geomembrane* menggunakan aplikasi GeoStudio.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Dibawah ini merupakan beberapa penelitian yang berhubungan yang pernah dilakukan sebelumnya :

2.1.1 Studi Analisis Dimensi dan Stabilitas Tubuh Bendungan Urugan Beringin Sila

Penelitian yang dilakukan oleh Natalia Yuliana Margaretha, I Made Kamiana, Dwi Anung Nindito dan dipublikasikan dalam Jurnal Teknik Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Keteknikan, Vol. 4 No. 1 Oktober 2020 : 81-89. Penelitian yang dilakukan oleh (Natalia Yuliana Margaretha et al., 2020) membahas mengenai perencanaan dan analisa desain dimensi bendungan urugan Beringin Sila yang difungsikan untuk memenuhi kebutuhan air masyarakat di Kecamatan Utan, Kabupaten Sumbawa. Perencanaan bendungan berupa bendungan urugan batu dengan inti kedap air tegak dibahas dalam studi ini. Dimensi bendungan direncanakan dengan menggunakan perhitungan tampungan bendungan, tinggi muka air normal, tinggi muka air banjir dan tampungan mati, sehingga menghasilkan dimensi tubuh bendungan berupa tinggi jagaan, tinggi bendungan, lebar mercu bendungan, panjang bendungan, kemiringan lereng hulu dan kemiringan lereng hilir, perlindungan lereng tubuh bendungan, pondasi bendungan dan drainase bendungan. Dalam studi ini, stabilitas tubuh bendungan dianalisis untuk kemungkinan aliran filtrasi dan longsoran pada lereng tubuh bendungan. Analisa stabilitas lereng terhadap filtrasi berupa : Formasi Garis Depresi yang dihitung menggunakan metode Cassagrande, Jaringan trayektori digambar

menggunakan metode grafis forchheimer, Kapasitas aliran infiltrasi. Stabilitas longsor pada lereng tubuh bendungan dihitung menggunakan metode bishop. Analisa stabilitas terhadap boiling dan piping menggunakan persamaan $v = k.i$.

Hasilnya adalah setelah dilakukan analisa hidrologi maka didapatkan kebutuhan air rencana sebesar $58.667.760 \text{ m}^3$. Data kebutuhan digunakan untuk merencanakan elevasi dan volume tampungan M.A.R dan M.A.N. Tinggi jagaan adalah 3,24 meter. Tinggi bendungan adalah 85,84 meter. Lebar mercu bendungan 13 meter. Panjang bendungan 800,93 meter. Stabilitas tubuh bendungan ditinjau terhadap aliran filtrasi dengan kapasitas aliran (Q_f) $11,88 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{det} < 11,8 \text{ m}^3/\text{det}$ sehingga aman. Stabilitas terhadap longsor dengan angka keamanan (F_s) $4,34 > 1,2$ sehingga aman .

2.1.2 Analisis Stabilitas Lereng Pada Bendungan Titab

Penelitian yang dilakukan oleh Tjokorda Gde Suwarsa Putra, I Nyoman Aribudiman, dan Gede Rico Juliawan dipublikasikan dalam Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Volume 20, 2019. Penelitian yang dilakukan oleh (Putra et al., 2019) membahas tentang kemantapan lereng pada bagian upstream bendungan Titab di Tukad Saba, Kecamatan Seririt di Kabupaten Buleleng. Jenis bendungan merupakan bendungan urugan sehingga analisis perencanaan terkait stabilitas lereng tanah pada bendungan. Analisa stabilitas lereng bendungan menggunakan alat bantu program komputer yaitu GeoStudio 2007 dengan fitur *SLOPE/W*. Pada analisa stabilitas bendungan digunakan material geotekstil pada tubuh bendungan. Dari hasil penelitian dengan pemasangan geotekstil pada tubuh bendungan

didapatkan nilai FS adalah 1,2 dan jika tidak menggunakan geotekstil maka FS lereng bendungan tersebut tidak mencapai 1,2 artinya lereng tidak aman.

2.1.3 Studi Perbandingan Desain Inti Bendung Dengan Pemakaian Material Alternatif Untuk Optimasi Biaya

Penelitian yang dilakukan oleh Victor Anton Sutresno, Noor Endah Mochtar, Indrasurya B. Mochtar dan dimuat dalam Jurnal Aplikasi Teknik Sipil, Volume 20, Nomor 3, Agustus 2022. Studi kasus penelitian ini pada Proyek Bendungan Tapin, Banjarmasin, Kalimantan Selatan. Menurut (Victor Anton Sutresno et al., 2022) yang melatarbelakangi penelitian berupa kendala saat pelaksanaan konstruksi yaitu ketersediaan material lempung untuk zona inti yang ada pada sekitar proyek sehingga muncul gagasan untuk memanfaatkan material hasil galian spillway sebagai material zona inti yang dikombinasikan dengan *geomembrane* untuk peningkatan impermeabilitasnya. Analisa stabilitas tubuh bendung berupa analisa longsor dan infiltrasi menggunakan aplikasi GeoStudio. Dari penelitian ini didapatkan hasil bahwa penggunaan *geomembrane* sebagai lapisan kedap air dan pengganti material filter halus sangat berpengaruh terhadap penurunan debit rembesan. Selain itu penggunaan material alternatif berupa penggunaan material buangan galian dan dilapisi material *geomembrane* dapat mengurangi penggunaan biaya atau optimasi biaya pada setiap desain yang ditawarkan.

Hasil didapatkan bahwa desain E dengan penggunaan material berupa galian *spillway*, *filter* halus, *filter* kasar, *rockfil*, *rip-rap*, *geotextile non woven* dan *geomembrane* dengan perubahan kemiringan zona inti sisi hulu 1:1 paling

ekonomis. Dengan angka keamanan kritis sebesar 1,260 terjadi pada kondisi *Rapid Drawdown* dari HWL ke pintu air pada hari ke-15 dan menghasilkan optimasi biaya sebesar 83,6 Milyar atau lebih hemat 27,53% dari desain awal.

2.2 Pengertian Bendungan

Bendungan urugan adalah suatu bendungan yang dibangun dengan cara menimbun bahan-bahan seperti : batu, krakal, krikil, pasir dan tanah pada komposisi tertentu dengan fungsi sebagai pengempang atau pengangkat permukaan air yang terdapat di dalam waduk di udiknya disebut bendungan tipe urugan atau bendungan urugan (Ramadani&Warsito,2020). Berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 37 Tahun 2010 tentang bendungan, bendungan adalah bangunan yang berupa urugan tanah, urugan batu, beton, dan atau pasangan batu yang dibangun selain untuk menahan dan menampung limbah tambang (*tailing*), atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk. Bendungan urugan adalah sebuah bendungan yang dibangun dengan bahan-bahan timbunan berupa batu, krakal, kerikil, pasir dan tanah dengan komposisi tertentu yang difungsikan untuk pengempang atau pengangkat permukaan air yang berada didalam waduk.

Menggunakan bahan timbunan yang digunakan berdasarkan dari ukuran butiran , maka secara umum bendungan tipe urugan dibedakan menjadi 2 yaitu :

1. Bendungan dengan urugan batu (*rock fill dam*) atau bendungan batu.
2. Bendungan dengan urugan tanah (*earth fill dam*) atau bendungan tanah.

Saat hujan deras dan sungai mengalir deras, bendungan berfungsi menampung dan menyimpan air. Air tersebut akan ditampung dan digunakan untuk air minum, pertanian, dan keperluan lainnya. Air sungai yang tertampung dalam

jumlah besar akan dibuang ke hilir sungai sesuai kebutuhan. Bendungan dapat dibangun dari beton atau tanah yang dipadukan dengan batu-batu kecil hingga besar.

2.3 Klasifikasi Bendungan Urugan

Bendungan merupakan konstruksi penampung air secara garis besar konstruksi tubuh bendung direncanakan untuk dapat menahan rembesan air dari hulu ke hilir sehingga air dapat ditampung sesuai dengan volume rencana..

Ditinjau dari penampatan susunan bahan yang membentuk tubuh bendungan untuk dapat memenuhi fungsinya maka bendungan urugan dapat dibagi menjadi 3 tipe utama :

1. Bendungan urugan homogen (bendungan homogen).
2. Bendungan urugan zonal (bendungan zonal).
3. Bendungan urugan bersekat (bendungan sekat).

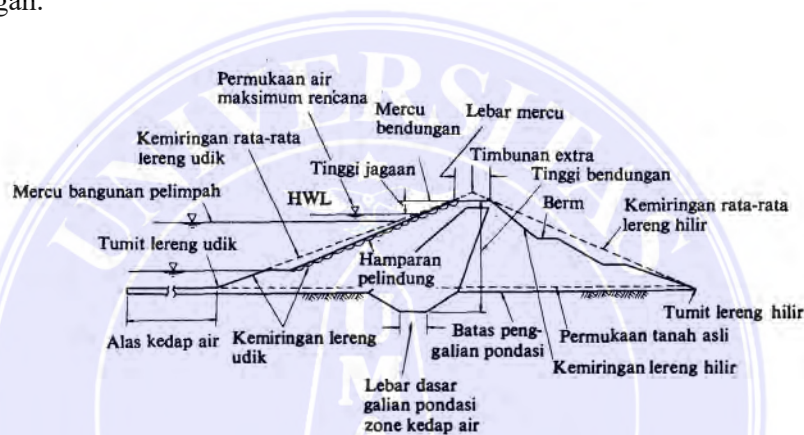
Untuk membedakan ketiga tipe bendungan tersebut, maka digambarkan pada berikut tentang klasifikasi umum bendungan urugan :

Type:	Skema Umum	Keterangan
Bendungan Homogen		Apabila 80% dari seluruh bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang bergradasi hampir sama.
Bendungan Tiral		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan tiral kedap air di udiknya.
Bendungan Zonal		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 tengah udiknya, yang biasanya terbuat dari lembaran baja tahan karat, lembaran beton bertulang, aspal beton, lembaran plastik, dll. nya.

Gambar 1. Klasifikasi Umum Bendungan Urugan (Soedibyo, 1993)

2.4 Dimensi Bendungan Urugan

Bentuk dan proporsi batuan beku dipengaruhi oleh kebutuhan udara rencana, volume penyimpanan rencana, dan pelacakan banjir. Faktor tersebut akan digunakan untuk merencanakan dimensi bendungan yaitu tinggi bendungan, tinggi jagaan, lebar puncak bendungan, panjang bendungan, kemiringan lereng bendungan, pelindung lereng bendungan, pondasi bendungan serta drainase bendungan.



Gambar 2. Istilah untuk bendungan urugan (Sosrodarsono and Takeda, 2002)

2.4.1 Tinggi Bendungan (H)

Perbedaan antara elevasi permukaan pondasi dan elevasi tanggul bendungan disebut ketinggian beku. Bagian bawah zona kedap udara atau dasar dinding kedap air berfungsi sebagai permukaan pondasi.

$$H = \text{Elv.}_{\text{MAB}} - \text{Elv.}_{\text{DB}} + H_f$$

Dengan :

H : tinggi bendungan (m)

Elv._{MAB} : elevasi muka air banjir (m)

Elv._{DB} : elevasi dasar bendungan (m)

H_f : tinggi jagaan (m)

2.4.2 Tinggi Jagaan (Hf)

Perbedaan antara tinggi permukaan maksimum rencana air dalam waduk dan tinggi mercu bendungan disebut sebagai tinggi jagaan. Desain menggunakan tinggi banjir rencana waduk untuk mendapatkan elevasi permukaan air maksimum rencana. Elevasi permukaan air normal atau elevasi permukaan banjir waduk kadang lebih tinggi dari elevasi banjir rencana dan dalam keadaan yang demikian disebut elevasi permukaan air maksimum rencana merupakan elevasi yang paling tinggi yang diperkirakan akan dicapai oleh permukaan air waduk.

Ketinggian bendungan tanggul sangat rentan terhadap limpasan. Ketika timbunan gagal, drainase biasanya terjadi di puncak bendungan. Oleh karena itu, pelat bebas timbunan sampah harus dibuat dengan cermat dan benar.

Tinggi jagaan (Hf) dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$H_f = \Delta h + h_w + h_e + h_a + \frac{h_i}{2}$$

Dengan :

- Δh : tinggi kemungkinan kenaikan permukaan air waduk yang terjadi akibat timbulnya banjir abnormal
- h_w : tinggi ombak akibat tiupan angin
- h_e : tinggi ombak akibat gempa
- h_a : tinggi kemungkinan kenaikan permukaan air waduk, apabila terjadi kemacetan-kemacetan pada pintu bangunan pelimpah.
- h_i : tambahan yang didasarkan pada tingkat urgensi dari waduk.

2.4.3 Lebar mercu (b)

Lebar mercu bendungan harus mencukupi agar puncak bendungan dapat bertahan terhadap aliran filtrasi yang melewati bagian atas badan bendungan serta pecahnya gelombang pada permukaan lereng yang dekat dengan mercu. Berdasarkan kegunaannya sebagai jalan eksploitasi, pemeliharaan bendungan, dan jalan lalu lintas umum, maka lebar mercusuar bendungan perlu dipertimbangkan.

Lebar minimum mercu bendungan (b), dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$b = \frac{1}{3} H$$

Dengan :

- b : lebar mercu
- H : tinggi bendungan

2.4.4 Panjang Bendungan

Panjang bendungan adalah seluruh panjang mercu bendungan yang bersangkutan, termasuk bagian yang digali pada tebing-tebing sungai di kedua ujung mercu tersebut.

2.4.5 Kemiringan Lereng Bendungan

Kemiringan lereng adalah besarnya sudut yang terbentuk dari sebuah perbedaan tinggi tertentu pada bendung.

1. Kemiringan lereng hulu (Fsu)

$$F_{su} = \frac{H}{1} \tan \phi \approx 1,1$$

Dengan :

Fsu : angka keamanan kemiringan lereng hulu



- m : kemiringan lereng hulu
 k : koefisien gempa
 ϕ : sudut geser dalam bahan timbunan ($^{\circ}$)

2. Kemiringan lereng hilir (Fsd)

$$Fsd \bar{A} = \frac{1}{1 + k \tan^2 \phi} \tan \phi \bar{A} \quad 1,1$$

Dengan :

- Fsd : angka keamanan kemiringan lereng hilir
 n : kemiringan lereng hilir
 k : koefisien gempa
 ϕ : sudut geser dalam bahan timbunan ($^{\circ}$)

2.5 Gaya dan beban yang bekerja pada bendungan

Menurut (Sosrodarsono & Takeda, 2002) gaya dan beban yang bekerja pada bendungan urugan perlu diperhitungkan. Gaya dan beban yang bekerja pada bendungan urugan sebagai berikut : beban akibat dari berat sendiri bendungan yang diteruskan ke pondasi, tekanan hidrostatis akibat air yang ditampung oleh bendungan dan air yang mengalir di hulu bendungan, tekanan air pori pada tubuh bendungan.

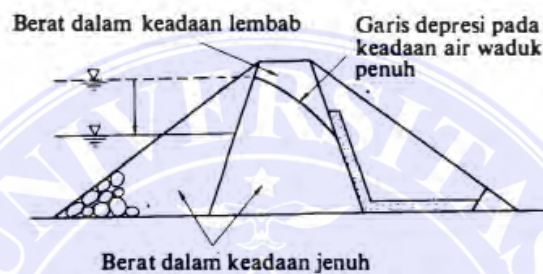
2.5.1 Beban berat tubuh bendungan

Beberapa keadaan yang paling tidak menguntungkan terhadap besarnya beban berat tubuh bendungan, sebagai berikut :

- a. Kondisi Lembab setelah tubuh bendungan selesai dibangun.
- b. Kondisi setelah muka air waduk mencapai ketinggian penuh, dimana bagian bendungan yang berada di atas garis depresi dalam kondisi lembab,

sedangkan bagian bendungan yang berada di bawah garis depresi dalam kondisi jenuh

- c. Pada kondisi dimana terjadi gejala penurunan mendadak (rapid draw-down) permukaan air waduk, sehingga semua bagian bendungan yang semula terletak dibawah garis depresi tetap dianggap jenuh. Ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 3. Kondisi-kondisi perhitungan beban berat tubuh bendungan (Sosrodarsono & Takeda, 2002)

2.5.2 Beban hidrostatis

Lereng sedimen biasanya terkena beban hidrostatis, dan beban yang dapat dihitung disesuaikan dengan gaya yang bekerja pada badan sedimen.

2.5.3 Tekanan air pori

Gaya akibat dari tekanan air pori dianggap bekerja tegak lurus terhadap lingkaran bidang lurus. Besarnya gaya-gaya yang disebabkan oleh tekanan air pori dapat dilakukan dgn cara berikut :

- a. Gaya-gaya dari tekanan air pori yang timbul pada saat pelaksanaan pembangunan bendungan.

Metode tegangan total (*whole stress method*) digunakan untuk perhitungan stabilitas tubuh bendungan. Perhitungannya mencakup gaya-gaya yang berhubungan dengan tekanan air pori. Namun kestabilan badan bendungan akan lebih tinggi dari hasil perhitungan jika material berada pada kondisi dengan kadar air lebih basah dari kadar air ideal.

Angka kestabilan (faktor keamanan) tubuh bendung yang lebih mendekati kondisi sesungguhnya, dapat menggunakan metode perhitungan tegangan efektif (*effective stress method*).

Metode perhitungan efektif memerlukan data-data tekanan air pori yang diperoleh dari pengukuran dengan alat kompresi tri-sumbu (*triaxial compression device*) pada pengujian konsolidasi tertutup (*C-U Test*).

Tekanan air pori dapat dihitung dengan persamaan :

$$\bar{\sigma} = \frac{\bar{\sigma}' + P}{1 - \Delta}$$

$$\bar{\sigma}' = \frac{\bar{\sigma} - P}{1 - \Delta}$$

dimana :

$$\Sigma : \sigma' + P$$

P : tekanan air pori

Pa : tekanan atmosfer pada bendungan tepat sesudah selesainya pelaksanaan

Δ : prosentase pemadatan terhadap volume asal

Va : prosentase rongga udara pada pori-pori bahan sesudah pemadatan terhadap volume asal

- H : kelarutan udara di dalam air (konstanta Henry dalam temperatur 20°C, sama dengan 0,0198).
- V_w : prosentase volume air pori sesudah konsolidasi terhadap volume asal
- Σ : tegangan total bahan
- σ' : tegangan efektif bahan
- A : koefisien kelulusan bahan terhadap air (0,3 s/d 0,8) untuk bendungan tanah yang diperlengkapi dengan drainase, harga A = 0,5 s/d 0,8 untuk bendungan inti atau tirai, harga A = 0,3 s/d 0,5
- b. Gaya-gaya dari tekanan air pori pada keadaan waduk terisi penuh.
Zona kedap air tubuh bendungan dengan nilai permeabilitas lebih besar dari 5×10^{-5} cm/dt, maka tekanan air porinya akan mendekati tekanan air yang sesuai dengan tingginya (tekanan gravitasi air).
- c. Gaya-gaya dari tekanan pori yang timbul pada saat terjadinya penurunan mendadak permukaan air waduk.
Laju penurunan dan permeabilitas material yang dihasilkan menentukan seberapa besar tekanan udara yang ada pada pori-pori lapisan tubuh ketika permukaan reservoir turun secara tiba-tiba.

2.6 Material Timbunan

Menurut (Affandi, 2014) berdasarkan bahan ajar pemadatan dan timbunan pada diklat PU tahun 2015, secara garis besar bahan atau material timbunan tubuh bendungan dapat dibedakan dalam 2 (dua) macam, yaitu :

1. Material yang fungsi utamanya untuk mendukung stabilitas tubuh bendungan, berupa material lulus air, seperti pasir, kerikil dan batu.
2. Material yang fungsi utamanya untuk mencegah rembesan air dari waduk, berupa material kedap air yang umumnya berupa tanah lempungan.

Material lulus air umumnya sensitif terhadap kadar air yang dikandungnya namun material kedap air sangat sensitif terhadap kadar air didalam material. Material yang digunakan sebagai bahan penyusun timbunan bendungan harus disesuaikan dengan persyaratan sebelum digunakan. Material tubuh bendung yang digunakan terutama tanah tidak mengandung zat-zat organik atau zat-zat yang mudah larut.

Menurut (Affandi, 2014) material timbunan/urugan, secara umum dapat dibedakan dalam 3 jenis yaitu :

1. Tanah
2. Pasir Kerikil
3. Batu

2.6.1 Material Tanah

Tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel-partikel padat tersebut (Das, 1995). Istilah pasir (*sand*), lempung (*clay*), lanau (*silt*), dan lumpur (*mud*), digunakan untuk menggambarkan ukuran partikel pada batasan ukuran butiran yang telah ditentukan dan juga untuk menjelaskan sifat fisis tanah.

Tanah sangat penting terutama sebagai material kedap air dalam suatu pembangunan bendungan urugan. Menurut (Affandi, 2014) syarat teknis terpenting tanah sebagai material tubuh bendung berikut :

- a. Ditinjau dari stabilitas bendungan, kepadatan dan kuat geser harus memadai.
- b. Permeabilitas tanah harus sesuai dengan persyaratan yang diperlukan.
- c. Indeks kompresi kecil.
- d. Mudah dikerjakan (pada penggalian, pengolahan, pengangkutan, penimbunan dan pematatannya).

Dari ukuran butiran atau distribusi ukuran butiran suatu material dapat ditentukan sifat teknisnya. Tanah dengan butiran kasar yang tercampur homogen dengan butiran yang lebih halus merupakan bahan yang baik untuk stabilitas bendungan namun semakin kecil ukuran butiran tanah koefisien filtrasinya akan semakin rendah (Affandi, 2014). Material kedap air (ASTM D 2487-90) terdiri dari : lempung berplastisitas rendah (CH dan CI), pasir lempungan dan kerikil lempungan (SC-GC), dan lanau lempungan (CL-ML). Material ini biasa digunakan sebagai material urugan kedap air dengan koefisien permeabilitas setelah dipadatkan lebih kecil dari orde 10^{-5} cm/s.

Klasifikasi tanah adalah ilmu yang berhubungan dengan kategorisasi tanah berdasarkan karakteristik yang membedakan masing-masing jenis tanah. Klasifikasi tanah merupakan subjek yang dinamis yang mempelajari struktur dari sistem klasifikasi tanah, defenisi dari kelas-kelas yang digunakan untuk penggolongan tanah, kriteria yang menentukan penggolongan tanah, hingga

penerapannya di lapangan (Darwis, 2018). Klasifikasi tanah umumnya didasarkan atas ukuran partikel yang diperoleh dari hasil analisa saringan serta plastisitas.

a. Klasifikasi Berdasarkan Butir Tanah (Metode Umum)

Klasifikasi tanah umumnya dibagi berdasarkan ukuran butir-butir tanah.

Berdasarkan hal tersebut, tanah dibagi sebagai berikut :

Tabel 1. Pembagian Jenis Tanah Berdasarkan Ukuran Butir (Darwis, 2018)

Jenis Tanah	Batas Ukuran Butir
Berangkal (<i>Boulder</i>)	>8 inchi (20 cm)
Kerakal (<i>Cobblestone</i>)	3 inchi – 8 inchi (8 – 20 cm)
Batu Kerikil (<i>Gravel</i>)	2 mm – 3 inchi (2mm – 8 cm)
Pasir Kasar (<i>Course Sand</i>)	0,6 mm – 2 mm
Pasir Sedang (<i>Medium Sand</i>)	0,2 mm – 0,6 mm
Pasir Halis (<i>Fine Sand</i>)	0,06 mm – 0,2 mm
Lanau (<i>Silt</i>)	0,002 mm – 0,06 mm
Lempung (<i>Clay</i>)	< 0,002 mm

Untuk tanah-tanah dengan ukuran butir kasar, sifatnya tergantung pada ukuran butirnya, sehingga distribusi butir-butir merupakan sifat yang digunakan untuk menggolongkan tanah granuler. Pada tanah berbutir halus tidak terlihat langsung sifatnya dengan ukuran butirnya oleh karena itu diperlukan metode lain terutama percobaan Batas Atterberg atau percobaan dilatansi.

b. Klasifikasi Tanah Metode USCS

Klasifikasi tanah sistem USCS (*Unified Soil Classification System*), diajukan pertama kali oleh Casagrande dan selanjutnya dikembangkan oleh *United State Bureau of Reclamation (USBR)* dan *United State Army Corps of Engineer (USACE)*. Kemudian *American Standard Testing of Materials (ASTM)*, telah memakai USCS sebagai metode standar guna mengklasifikasikan tanah. Sistem ini mengelompokkan tanah ke dalam dua kelompok besar, yaitu :

- 1) Tanah berbutir-kasar (*coarse-grained-soil*), yaitu : tanah kerikil dan pasir di mana kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No.200. Simbol dari kelompok ini di mulai dengan huruf awal G atau S. G adalah untuk kerikil (*gravel*) atau tanah berkerikil, dan S adalah untuk pasir (*sand*) atau tanah berpasir.
- 2) Tanah berbutir-halus (*fine-grained-soil*), yaitu tanah di mana lebih dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No.200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal M untuk lanau (*silt*) anorganik, C untuk lempung (*clay*) anorganik, dan O untuk lanau-organik dan lempung organik. Simbol PT digunakan untuk tanah gambut (*peat*), *muck* dan tanah-tanah lain dengan kadar organik yang tinggi.

Menurut (Bowles, 1986) kelompok-kelompok tanah utama sistem klasifikasi *Unified* dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2. Sistem Klasifikasi Tanah USCS (Bowles, 1986)

Jenis Tanah	Simbol	Sub Kelompok	Simbol
Kerikil	G	Gradasi Baik	W
		Gradasi Buruk	P
Pasir	S	Berlanau	M
		Berlempung	
Lanau	M		C
Lempung			
Organik	C	WL < 50%	L
	O	WL > 50%	H
Gambut	Pt		

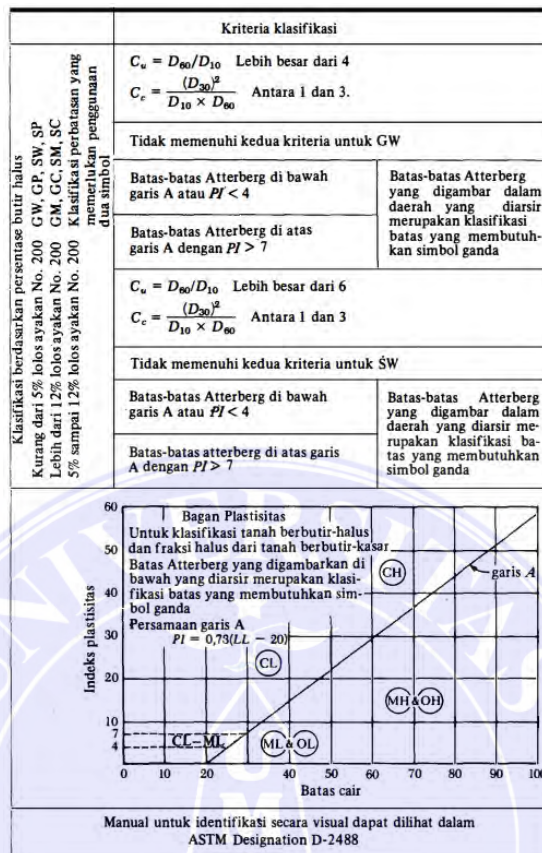
Dimana :

W = *Well Graded* (tanah dengan gradasi baik)

P = *Poorly Graded* (tanah dengan gradasi buruk)

L = *Low Plasticity* (plastisitas rendah, LL < 50)

H = *High Plasticity* (plastisitas tinggi, LL > 50)

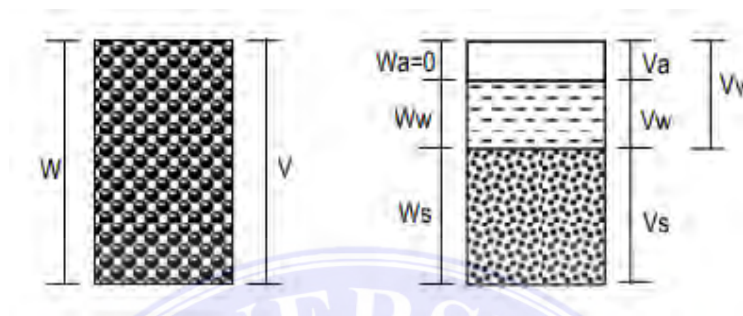


Gambar 4. Kriteria Klasifikasi Sistem USCS (Das, 1995)

Sifat fisis tanah dasar sangat mempengaruhi berbagai elemen struktur yang akan dibangun di atasnya. Properti tanah ditunjukkan dengan berbagai parameter yang disebut dengan indeks properti tanah seperti berat volume, kadar air, porositas, angka pori, derajat kejenuhan, derajat kepadatan, derajat kerapatan, berat jenis, analisis butiran, batas cair, batas plastis, batas susut, dan sebagainya. Parameter teknis tanah dipengaruhi oleh sifat fisis tanah seperti koefisien konsolidasi, kohesi, sudut geser dalam dsb.

a. Berat Volume Tanah

Tanah terdiri dari butiran, air dan udara. Masing-masing elemen tanah memiliki volume dan berat. Elemen tanah tersebut diilustrasikan pada gambar diagram fase tanah berikut :



Gambar 5. Diagram Fase Tanah (Darwis, 2018)

Keterangan :

- W : Berat total tanah
- W_a : berat udara = 0 (diabaikan)
- W_w : berat air
- V : volume total tanah
- V_a : volume udara
- V_w : volume air
- V_v : volume pori
- V_s : volume butir

Berat volume tanah dapat dirumuskan sebagai berikut :

Berat volume basah merupakan perbandingan antara berat butiran tanah termasuk air dan udara (W) dengan volume total tanah (V). Rumus berikut

$$\gamma_b = \frac{W}{V}$$

Berat volume kering : perbandingan antara berat butiran padat (W_s) dengan volume total tanah (V). Persamaan berikut :

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

Berat volume butiran padat : perbandingan antara berat butiran padat (W_s)

dengan volume butiran padat (V_s). Persamaan berikut :

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

b. Porositas dan Angka Pori Tanah

Porositas merupakan perbandingan antara volume rongga (V_v) dengan volume total (V). Nilai porositas dinyatakan dalam persen (%). Persamaan sebagai berikut :

$$n = \frac{V_v}{V}$$

c. Angka Pori

Perbandingan antara rongga (V_v) dengan volume butiran (V_s). Persamaan sebagai berikut :

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

d. Kadar Air (*water content*)

Perbandingan antara berat air (W_w) dengan berat butiran padat (W_s) di dalam massa tanah. Persamaan sebagai berikut :

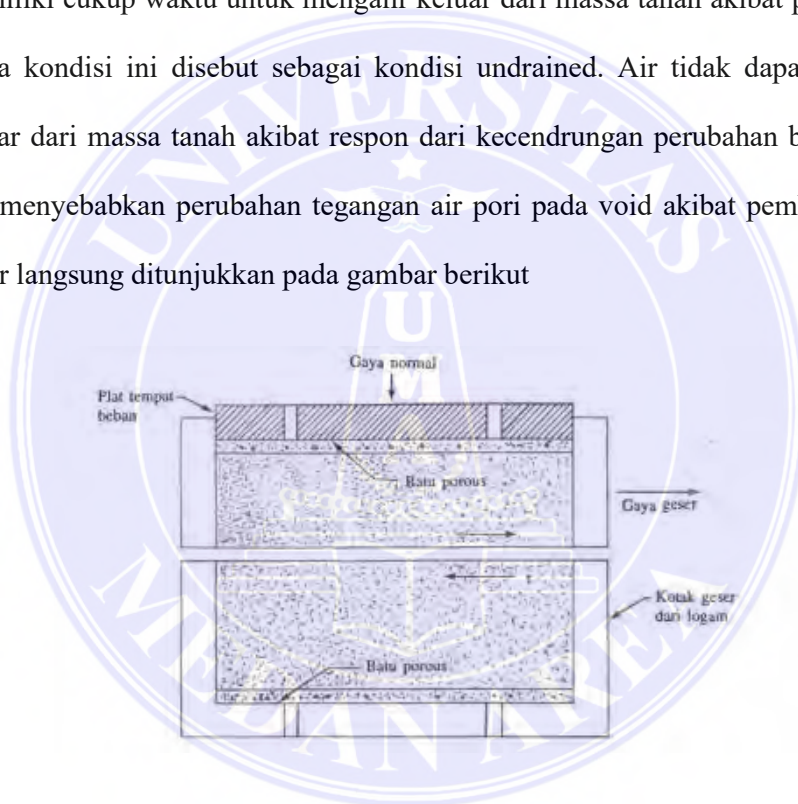
$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\%$$

e. Derajat Kejenuhan

Perbandingan antara volume air (V_w) dengan volume total rongga pori (V_v). Persamaan sebagai berikut :

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100\%$$

Kuat geser tanah dipengaruhi oleh massa tanah dengan kondisi *drained* dan *undrained*. Kondisi dimana tidak terjadi perubahan tegangan air pori akibat pembebanan yang diberikan dalam suatu rentang waktu tertentu disebut sebagai kondisi *drained*. Air dapat berpindah bebas ketika volume *void* bertambah maupun berkurang akibat pengaruh beban sehingga pembebanan tidak menimbulkan perubahan pada tekanan air pori. Apabila dalam rentang waktu tertentu air tidak memiliki cukup waktu untuk mengalir keluar dari massa tanah akibat pembebanan maka kondisi ini disebut sebagai kondisi *undrained*. Air tidak dapat berpindah keluar dari massa tanah akibat respon dari kecenderungan perubahan volume *void* dan menyebabkan perubahan tegangan air pori pada *void* akibat pembebanan. Uji geser langsung ditunjukkan pada gambar berikut



Gambar 6. Alat Uji Kuat Geser Langsung (Das, 1995)

Kekuatan geser adalah kemampuan suatu material atau komponen terhadap suatu jenis beban atau kegagalan struktur yang mengakibatkan material atau komponen tersebut gagal karena geseran. Gaya geser adalah gaya yang cenderung menghasilkan gesekan pada material sepanjang bidang yang sejajar dengan arah gaya. Menurut Duncan dan Wright (2005) kekuatan geser adalah

tegangan geser maksimum yang dapat bertahan dari tanah. Asumsi bahwa ada dua elemen utama yang menentukan kekuatan geser pada tanah, yaitu kohesi, yang bergantung pada jenis tanah dan kepadatannya, dan gaya gesek antar butiran tanah, yang berbanding lurus dengan tekanan normal pada bidang geser, maka Coulomb (1776) mendefinisikan kuat geser sebagai berikut :

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

dimana :

τ = kuat geser tanah (kN/m²)

c = kohesi tanah (kN/m²)

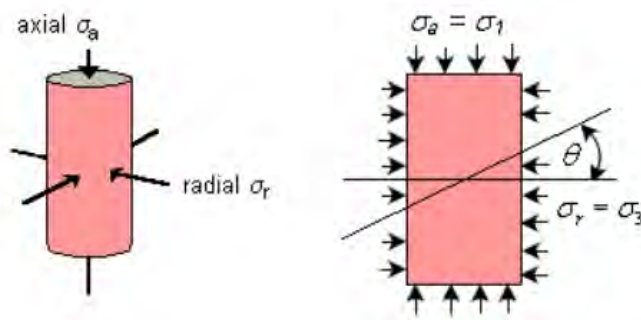
ϕ = sudut gesek dalam tanah (°)

σ = tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m²)

Pengertian kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan (Darwis, 2018). Berdasarkan pengertian tersebut apabila tanah menerima pembebanan maka beban akan ditahan oleh :

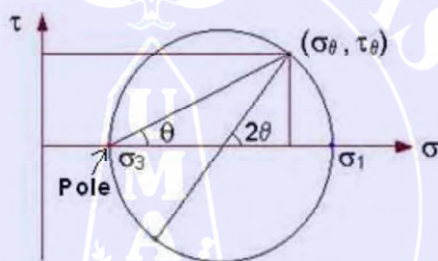
- a. Kohesi tanah tergantung pada jenis tanah dan kepadatannya, tetapi tidak tergantung pada tekanan normal yang bekerja pada permukaan geser.
- b. Gesekan antara butiran tanah yang ukurannya berbanding lurus dengan tekanan normal pada bidang gesernya.

Untuk mengetahui kedua parameter di atas maka dapat dilakukan pengujian dengan sampel tanah berbentuk silinder. Ilustrasi tegangan yang terjadi digambarkan pada gambar berikut :



Gambar 7. Sampel silinder untuk pengujian kuat geser tanah (Darwis, 2018)

Tegangan normal dan tegangan geser yang bekerja pada bidang runtuh di dalam sampel tanah maka direpresentasikan secara grafis dari tegangan yang disebut lingkaran mohr. Gambar lingkaran mohr ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 8. Lingkaran Mohr (Darwis, 2018)

Tegangan normal, adalah

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta$$

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cos 2\theta$$

Kuat geser , adalah

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta$$

Nilai perbandingan maksimum antara kuat geser terhadap tegangan normal, cenderung akan terjadi ketika terbentuk sudut :

$$45^\circ \bar{A}$$

$$2$$

Dimana :

α adalah kemiringan garis yang bersinggungan dengan lingkaran Mohr dan melewati titik pangkal (0,0).

Berdasarkan teori tersebut, Mohr (1910) menyatakan bahwa kondisi keruntuhan suatu bahan akan terjadi akibat adanya kombinasi antara kondisi kritis dari tegangan normal dan tegangan geser pada bidang runtuhnya, dinyatakan dalam persamaan berikut :

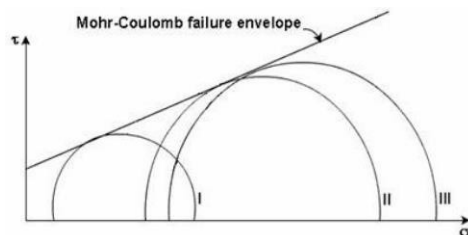
$$\tau = f(\sigma)$$

dimana :

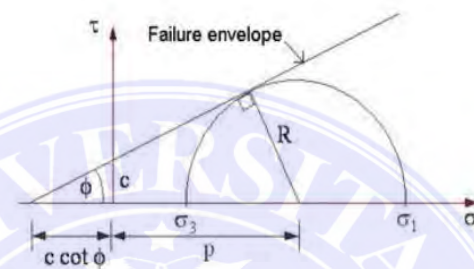
τ = tegangan geser pada saat terjadinya keruntuhan atau kegagalan (*failure*)

σ = tegangan normal pada saat kondisi tersebut

Tegangan geser pada bidang keruntuhan akan menentukan kekuatan geser tanah. Kegagalan dapat terjadi pada bidang di mana tekanan geser maksimum beroperasi atau pada bidang di mana rasio tekanan geser terhadap tegangan normal tercapai pada tegangan maksimum. Kegagalan diasumsikan terjadi dan diakibatkan tekanan utama atau tegangan geser. Hal ini dapat diuji dengan pengujian triaksial. Lingkaran Mohr dari tegangan pada kegagalan sampel ditarik dengan menggunakan tegangan utama melalui pengujian tersebut. Berikut ditunjukkan lingkaran Mohr-Coulumb dan selimut keruntuhan (*failure envelope*) Mohr-Coulumb serta orientasi keruntuhan akhir ditentukan dengan metode kutub (*pole method*) berikut :



Gambar 9. Lingkaran Mohr Coulumb (Darwis, 2018)



Gambar 10. Kriteria keruntuhan Mohr-Coulumb *Pole Method* (Darwis, 2018)

Kriteria keruntuhan Mohr-Coulumb ditulis dengan persamaan berikut :

$$\tau_f = c + \sigma_f \cdot \tan \phi$$

Dimana :

τ_f = tegangan geser pada bidang kegagalan

c = kohesi tanah

σ_f = tegangan normal pada bidang kegagalan

ϕ = sudut gesekan dalam tanah

2.6.2 Material Pasir dan Kerikil

Material pasir dan kerikil umumnya digunakan sebagai material zona filter dan transisi pada suatu bendungan tipe urugan. Gradasi dari bahan pasir dan kerikil sangat penting untuk diperhatikan. Menurut (Affandi, 2014) persyaratan yang harus dipenuhi material pasir dan kerikil suatu bendungan sebagai berikut :

- a. Gradasi material sesuai dengan fungsi yang dibebankan pada lapisan atau zona-zona pada calon tubuh bendungan.
- b. Tingkat kekerasan material setinggi mungkin dan mempunyai kekuatan geser yang cukup tinggi.
- c. Tidak mengandung campuran zat-zat organik atau mineral-mineral yang mudah larut.
- d. Mempunyai kestabilan struktur yang tinggi terhadap pengaruh -pengaruh atmosfer maupun kimiawi lainnya.
- e. Mempunyai kemampuan drainase yang cukup memadai.

Menurut “Pedoman Uji Mutu Konstruksi Tubuh Bendungan Tipe Urugan” pasir dan kerikil bersifat non kohesif yang mempunyai sifat meluluskan air (*free drain*) dan mengandung butiran yang lolos saringan no. 200 kurang dari 5%.

2.6.3 Material Batu

Material batu digunakan sebagai zona lulus air pada bendungan dan sebagai pelindung pada lereng bendungan. Jenis batuan yang cocok sebagai material urugan pada bendungan ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 3. Jenis Batuan yang Cocok untuk Bendungan (Affandi, 2014)

Jenis batuan yang baik untuk digunakan sebagai bahan	Jenis batuan yang harus dipertimbangkan
Granit Basalt, andesit, dan riolit	Serpilh, batu sabak Tufa
Batu Pasir yang berumur sebelum era Mesozoik	Batu pasir yang berumur era konozoikum
Batu gamping Kwarsit	Gene, sekis yang mengandung banyak retakan

2.6.4 Material Campuran

Material campuran digunakan apabila material yang tersedia di lapangan tidak memenuhi persyaratan yang ditentukan. Misalnya material lempung dengan plastisitas tinggi dengan kadar air dan indeks plastisitas tinggi (CH) yang berpotensi bersifat ekspansif dan sulit dikerjakan pada kadar air mendekati kadar air optimum sehingga diperlukan stabilisasi tanah dengan pencampuran dengan material lain seperti pasir atau kapur.

2.6.5 Material *Random*

Ketersediaan material dengan kualitas yang lebih rendah di lapangan dapat dimanfaatkan sebagai material zona sembarang (*random zone*). Zona sembarang dengan zona lain bersama-sama berfungsi untuk mempertahankan kestabilan tubuh bendungan. Perhitungan stabilitas bendungan terutama perhitungan longsor, kekuatan geser material pelapis kedap air yang tipis biasanya diabaikan.

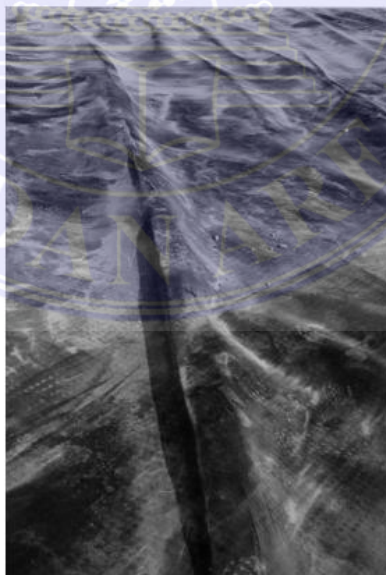
Menurut (Affandi, 2014) material yang dapat digunakan sebagai material random umumnya sebagai berikut :

- a. Material batu yang berasal dari batuan lunak yang mudah lapuk
- b. Material dari dua jenis material tanah, pasir atau kerikil yang tidak mungkin terpisahkan, karena pelapisannya pada tempat penggalian terlalu tipis.
- c. Material hasil galian dari pondasi zona kedap air atau pondasi bangunan pelengkap bendungan.
- d. Material hasil galian jalan-jalan masuk atau jalan eksploitasi.

- e. Material yang penyebarannya cukup luas tetapi tidak mempunyai karakteristik yang seragam.

2.6.6 Geomembrane

Geomembrane merupakan lapisan tipis yang terbuat dari lembaran-lembaran polimer tipis. *Geomembrane* dihasilkan dari proses polimerisasi molekul etilena $H_2C = CH_2$ disebut *polietilena* (PE). Susunan polimer *geomembrane* tidak benar-benar kedap namun relatif tidak dapat ditembus ketika dibandingkan dengan geotekstil atau tanah. *Geomembrane* umumnya ditempatkan di bagian hulu bendungan tanggul untuk membatasi migrasi air melalui badan bendungan. (Demirdogen, 2018). Nilai permeabilitas *geomembrane* yang diukur dengan tes tranmisi air berada dalam interval 1×10^{-12} hingga 1×10^{-15} m/s. HDPE *geomembrane* memiliki rasio kekuatan densitas dan gaya tarik yang tinggi.



Gambar 11. Material *Geomembrane* pada timbunan (Müller, 2007)

Klasifikasi *polietilena* dan nomenklatur resin PE sesuai ASTM ditunjukkan pada berikut :

Tabel 4. Spesifikasi untuk Bahan Cetakan dan Ekstruksi Plastik Polietilena dan ASTM D883-96 Terminologi Standar yang Berkaitan dengan Plastik (Müller, 2007)

<i>Density (g/cm³)*</i>	<i>Manufacturing process</i>	<i>Old terms as per ASTM D1248</i>	<i>New terms as per ASTM D883</i>
0.910-0.925	<i>Radical polymerisation</i>	<i>Low Density (LD)</i>	<i>Low Density (LD)</i>
0.919-0.925	<i>Catalytic polymerisation</i>	<i>Linear Low Density (LLD)</i>	<i>Linear Low Density (LLD)</i>
0.926-0.940	<i>Radical polymerisation</i>	<i>Medium Density (MD)</i>	<i>Medium Density (MD)</i>
0.926-0.940	<i>Catalytic polymerisation</i>	<i>Linear Medium Density (LMD)</i>	<i>Linear Medium Density (LMD)</i>
0.941 and above	<i>Catalytic polymerisation</i>	<i>High Density (HD)</i>	<i>High Density (HD)</i>

Berikut ditunjukkan pada tabel 2.6 standar dan persyaratan untuk material *geomembrane* HDPE menurut metode uji GM 13 dari *Geosynthetic Ins*

Tabel 5. Standar dan persyaratan material *geomembrane* HDPE (Müller, 2007)

Property, Test	Test Standard	Test Value (for 2.5 mm nom. Thickness)
<i>Thickness (lowest individual of 10 values)</i>	<i>ASTM D5199</i>	<i>Nom. thickness \geq ave. nom. thickness – 10%</i>
<i>Density</i>	<i>ASTM D1505 ASTM D792</i>	<i>0.940 g/ml (min.)</i>
<i>Tensile Properties</i>	<i>ASTM D638, Type IV</i>	<i>37 kN/ (min. Ave.) 67 kN/ (min. Ave.) 12% (min. Ave.) 700% (min. Ave.)</i>
<i>Yield stress</i>		
<i>Break stress</i>		
<i>Yield elongation</i>		
<i>Break elongation</i>		
<i>Tear Resistance</i>	<i>ASTM D1004</i>	<i>311 N</i>
<i>Puncture Resistance</i>	<i>ASTM D4833</i>	<i>800 N</i>
<i>Stress Crack Resistance</i>	<i>ASTM D5397</i>	<i>200 h</i>
<i>Oxidate Induction Time (OIT)</i>		
<i>Standard (Std) OIT</i>	<i>ASTM D3895</i>	<i>100 min (min. ave.)</i>
<i>High Pressure (HP) OIT</i>	<i>ASTM D5885</i>	<i>400 min (min. ave.)</i>

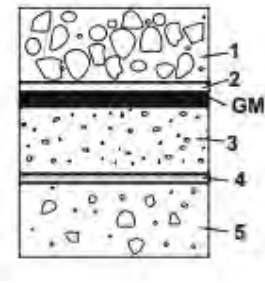
Lanjutan tabel 5. Standar dan persyaratan material *geomembrane* HDPE (Müller, 2007)

Property, Test	Test Standard	Test Value (for 2.5 mm nom. Thickness)
<i>Oven Ageing at 85 °C</i>	<i>ASTM D5721</i>	<i>55 % Std-OIT retained after 90 days 80% HP-OIT retained After 90 days</i>
<i>U-V Resistance</i>	<i>GM 11</i>	<i>50% HP-OIT retained After 1600 hrs</i>

Pemasangan *geomembrane* harus memperhatikan tanah dasar atau tempat dimana *geomembrane* akan dibuka dan dilas, sehingga permukaan tempat pemasangan *geomembrane* harus dipersiapkan. Bentuk, ukuran partikel dan distribusi partikel material harus sedemikian rupa sehingga beban selama proses konstruksi dan penggunaan tidak menyebabkan deformasi yang tidak dapat diterima dari material *geomembrane*.

Pemasangan atau penempatan material *geomembrane* terdiri dari fase berikut serta diilustrasikan pada gambar berikut :

- a. *Planning Installation*
- b. *Construction and preparation of the subgrade of the geomembrane*
- c. *Geomembrane installation i.e. transporting geomembrane rolls to the construction site, loosening, laying and cutting to size welding of the placed geomembranes panels, connection to structure penetration systems or buildings*
- d. *Placement of the protective layer*
- e. *Construction of the drainage layer*



Gambar 12. Diagram skematik sistem pelapis untuk *geomembrane* (Müller, 2007)

Keterangan gambar :

1. Lapisan drainase kerikil kasar
2. Lapisan *Geomembrane*
3. Lapisan pondasi (pasir)
4. Geotekstil pemisah atau filter (tergantung pada distribusi butiran)
5. Lapisan pengatur

Berikut ilustrasi pemasangan *geomembrane* pada timbunan ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 13. Ilustrasi Pemasangan *Geomembrane* pada Timbunan (Müller, 2007)

2.7 Persyaratan Material Timbunan

Material bendungan adalah material hasil galian dari daerah di sekitar lokasi rencana bendungan. Kualitas material harus sesuai dengan syarat teknis perencanaan dan dievaluasi melalui berbagai pengujian. Metode pelaksanaan yang digunakan juga harus sesuai standar dan pedoman perencanaan. Kuantitas atau ketersediaan material harus dihitung dan direncanakan sebelum pelaksanaan konstruksi bendungan agar tidak terjadi kegagalan desain konstruksi.

Anisotropi adalah sifat permeabilitas material yang tidak seragam pada arah aliran rembesan yang berbeda. Batasan koefisien *anisotropi* (K_h/K_v) pada bendung yang diijinkan sedangkan kriteria penerimaan rembesan pada tubuh bendung ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 6. Batasan K_h/K_v Pada Bendungan (Victor Dkk, 2022)

No	Material	Batasan K_h/K_v
1	Inti Bendungan Standard pemadatan USBR	4 sd 6
2	Inti Bendungan tanpa standar pemadatan	9 sd 36
3	Isian hidrolis (<i>Hydraulic Fill</i>)	64 sd 225
4	Zona pelindung stabilitas bendungan (Standard USBR)	4 sd 9
5	Zona drainase bendungan (Standar USBR)	1 sd 4

Tabel 7. Kriteria Penerimaan Rembesan Pada Tubuh Bendung (Victor Dkk, 2022)

No	Tinggi Bendungan (m)	Rembesan (Liter/Detik/m)	
		Aman	Tidak Aman
1	< 5	< 0,050	>0,075
2	5 – 10	< 0,075	>0,017
3	10 – 20	< 0,175	>0,350
4	20 – 40	< 0,350	>0,700
5	>40	< 0,700	>1,400

2.7.1. Zona Kedap Air

Material kedap air berfungsi untuk mencegah rembesan air dari waduk umumnya berupa lempungan. Persyaratan utama untuk material kedap air menurut (Affandi, 2014) dijelaskan sebagai berikut :

- a. Koefisien permeabilitas serta kekuatan geser yang sesuai
- b. Tingkat deformasi yang rendah
- c. Kemudahan pelaksanaan pemadatan dan pelaksanaan
- d. Tidak mengandung zat-zat organis serta bahan material yang mudah terurai.
- e. Dan lain-lain

Beberapa kriteria dari persyaratan tersebut diuraikan sebagai berikut :

1) Koefisien Permeabilitas

Koefisien permeabilitas (k) tidak boleh melebihi nilai 1×10^{-5} cm/s. Semakin halus suatu material dengan memperkirakan besarnya prosentase butiran material melalui saringan No.200 maka nilai k akan semakin rendah. Suatu material yang butiran halus dapat melalui saringan No.200 lebih rendah dari 7% maka material tersebut biasanya lulus air. Namun apabila lebih dari 50% maka material tersebut tidak dapat dipergunakan sebagai material kedap air karena plastisitasnya sangat tinggi dan berpotensi untuk mudah mengembang/menyusut (tanah dispersif). Nilai K suatu material akan paling rendah pada kadar air sedikit lebih tinggi dari kadar air optimumnya (OMC), yakni sekitar 23% OMC (*wet side*) (Affandi, 2014).

2) Kekuatan Geser

Material berbutir halus (lempungan), biasanya mempunyai kuat geser yang lebih rendah dibandingkan yang berbutir kasar (Affandi, 2014). Kuat geser material dipengaruhi oleh kadar air serta tingkat pemadatannya. Pada material berbutir kasar, perubahan-perubahan kuat gesernya tidak terlalu besar meskipun material tersebut mempunyai kemampuan penyerapan air yang

tinggi (angka porinya besar). Pemadatan suatu material tanah dilaksanakan pada kadar air mendekati kadar air optimum dan memberikan kuat geser yang tinggi. Namun pada waduk terisi air material menjadi jenuh air dan kuat gesernya akan menurun. Kuat geser suatu material ditentukan oleh kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Suatu material dengan tingkat kepadatan $D = 95\%$ s/d 98% baik untuk digunakan pada penimbunan tubuh bendungan. Sedangkan $D = 90\%$ s/d 95% digunakan untuk bendungan yang rendah < 30 meter (Affandi, 2014).

3) Konsolidasi

Semakin halus gradasi suatu material dan semakin tinggi kadar airnya, maka indeks kompresinya akan menjadi lebih besar dan tekanan air pori mungkin dapat meningkat pada saat berlangsungnya proses konsolidasi tersebut (Affandi, 2014). Selain tekanan hasil pemadatan timbul juga tekanan-tekanan tambahan hasil konsolidasi terutama material tubuh bendungan dengan kadar air yang lebih tinggi dari kadar air optimumnya maka pada saat penimbunan dan pemadatan tekanan air pori meningkat signifikan yang mempengaruhi stabilitas bendungan.

4) Kemudahan Pengerjaan

Penimbunan dan pemadatan pada umumnya lebih mudah dilaksanakan pada material berbutir kasar dibanding material berbutir halus. Pada kadar air sedikit rendah dari kadar air optimumnya (*dry side*), penimbunan dan pemadatan tanah akan lebih mudah dilaksanakan dibandingkan dengan tanah yang kadar airnya hanya beberapa persen saja bergeser ke arah yang lebih tinggi dari titik optimum tersebut (Affandi, 2014).

2.7.2. Zona Filter dan Transisi

Zona filter dan transisi berfungsi untuk mencegah terbawanya material halus dari zona inti sehingga pada bendungan pada bagian hulu dan hilir bendungan. Umumnya material yang digunakan pada zona filter dan transisi berupa pasir dan kerikil yang memiliki nilai kuat geser dan meluluskan air (drainase). Agar filter dapat berfungsi sebagai penyaring butiran-butiran halus dari zona inti yang dilindungi maka terdapat beberapa persyaratan yang harus dipenuhi menurut (Affandi, 2014) sebagai berikut :

- 1) Kriteria Pokok
 - a. Filter harus dapat mencegah terjadinya pengangkutan butir tanah oleh rembesan.
 - b. Permeabilitas (k) filter harus jauh lebih besar dari pada urugan yang dilindungi, permeabilitas filter sekitar 20-100 permeabilitas inti.
- 2) Kriteria Gradasi Filter
 - a. Persentase butir yang melewati saringan No.200 harus kurang dari 5% berat setelah dipadatkan.
 - b. $\frac{d_{15}}{d_{75}}$ harus > 5
 $\frac{d_{15A}}{d_{75A}}$

Koefisien permeabilitas filter, dapat diketahui dari hasil uji lapangan atau uji laboratorium terhadap contoh tanah tidak terganggu (Affandi, 2014). Pada perencanaan awal permeabilitas filter dapat diperkirakan dengan rumus empiris Hazen, berikut :

$$k = \frac{C}{10^2}$$

Keterangan :

- k : koefisien permeabilitas (cm/s)
- c : konstanta = 1, berlaku untuk pasir dan kerikil bergradasi seragam, tanpa sementasi dan bersih (lanau dan lempung < 5%)
- D10 : ukuran butir yang lewat saringan 10 % pada kurva gradasi material (mm)

2.7.3. Zona Batu

Bendungan urugan yang sebagian besar tubuhnya terdiri dari timbunan batu berdiameter rata-rata 10-75 cm disebut bendungan batu (*rockfill*). Menurut (Affandi, 2014) Material batu dianggap ideal, apabila memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- a. Ukuran diameter batu antara 45-60 cm dengan berat antara 250-500 kg atau lebih.
- b. Batu yang berdiameter kurang dari 10 cm yang terdapat dalam timbunan tubuh bendungan, komposisinya tidak diperkenankan melebihi 5%.
- c. Material batu tidak mudah pecah, baik dalam pengangkutan maupun pada saat penuangan dari alat pengangkutan (dumping).
- d. Berat jenisnya tidak kurang dari 2,5.
- e. Kuat tekan batu tidak kurang dari 700 kg/cm².
- f. Daya tahan terhadap pelapukannya tinggi (pada pengujian dengan cairan Na₂SO₄ penyusutannya tidak melebihi 0,015%).

Gradasi material batu berukuran besar, pemadatan yang dilakukan dengan metode pemadatan menuang-ratakan (dumping and slincing compaction). Apabila material batu mengandung 7% butiran halus (yang dapat melalui saringan No.200

dengan ukuran lubang 0,074 mm), maka material campuran ini akan bersifat kedap air. Akan tetapi apabila kandungan bahan berbutir halus hanya mencapai $> 4\%$ maka material campuran ini akan bersifat semi-kedap air (Affandi, 2014).

2.7.4. Zona Random

Material *random* merupakan hasil galian yang biasanya ditempatkan pada bagian bendungan yang tidak membahayakan, material ini tidak mempunyai kriteria persyaratan khusus. Namun, kandungan material haslu dan organik tetap tidak boleh $> 5\%$ (Affandi, 2014).

2.8 Stabilitas Bendungan

Stabilitas bendungan adalah kemampuan bendungan dalam menahan gaya-gaya yang bekerja pada bendungan dalam kondisi yang telah direncanakan. Stabilitas bendungan yang akan ditinjau berupa stabilitas bendungan terhadap kemungkinan kelongsoran dan rembesan. Berdasarkan panduan perencanaan bendungan urugan, Departemen PU, Juli 1999 tidak terdapat kriteria batas untuk volume aliran rembesan yang lewat tubuh bendungan maupun pondasi tetapi terdapat kriteria keamanan terhadap rembesan.

2.8.1 Stabilitas Bendungan Terhadap Longsoran

Kegagalan bendungan terjadi ditandai dengan longsoran yang terjadi pada lereng hulu maupun hilir bendungan akibat stabilitas timbunan tubuh bendung yang kurang baik. Oleh karena itu stabilitas lereng timbunan harus direncanakan dan dianalisa dengan baik dan tepat.

Dalam merencanakan suatu bendungan, kombinasi pembebanan digunakan yang paling tidak menguntungkan dengan memperkirakan faktor-faktor yang berpengaruh terhadap stabilitas bendungan baik dimensi, arah serta karakteristik lainnya. Faktor keamanan tubuh bendungan urugan umumnya direncanakan dengan nilai 1,2 atau lebih.

Berikut beberapa ciri bendungan tanggul yang dinilai kurang menguntungkan :

- a. Kondisi pada saat bendungan dalam keadaan penuh.
- b. Kondisi pada saat segera sesudah bendungan selesai dibangun.
- c. Kondisi pada saat bendungan terisi setengah.
- d. Kondisi pada saat terjadi gejala penurunan permukaan air mendadak dari elevasi permukaan penuh hingga elevasi permukaan terendah.
- e. Kondisi pada saat permukaan air bendungan mencapai elevasi tertinggi pada waktu yang relatif kecil.

Pehitungan stabilitas tubuh bendungan umumnya dilakukan dengan menggunakan metode irisan bidang luncur bundar (*slice method on circular slip surface*). Metode bidang luncur bundar dibagi dalam beberapa irisan vertikal, maka kemungkinan longsor yang terjadi diperoleh dengan menggunakan rumus keseimbangan berikut :

$$F_a = \frac{\sum (c + \sigma \tan \phi) + \sum W \cos \alpha}{\sum W \sin \alpha} \cdot \cos \alpha$$

Dimana :

Fa : faktor keamanan

- N : beban komponen vertikal yang timbul dari berat setiap irisan bidang luncur ($= \gamma \cdot A \cdot \cos \alpha$)
- T : beban komponen tangensial yang timbul dari berat setiap irisan bidang luncur ($= \gamma \cdot A \cdot \sin \alpha$)
- U : tekanan air pori yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur.
- N_e : komponen vertikal beban seismis yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur ($= e \cdot \gamma \cdot A \cdot \sin \alpha$)
- T_e : komponen tangensial beban seismis yang bekerja pada setiap irisan bidang luncurnya ($e \cdot \gamma \cdot A \cdot \cos \alpha$)
- Φ : sudut gesekan dalam bahan yang membentuk dasar setiap irisan bidang luncur.
- C : angka kohesi bahan yang membentuk dasar setiap irisan bidang luncur.
- Z : lebar setiap irisan bidang luncur.
- E : intensitas seismis horizontal
- γ : berat isi dari setiap bahan pembentuk irisan bidang luncur.
- A : luas dari setiap bahan pembentuk irisan bidang luncur.
- α : sudut kemiringan rata-rata dasar setiap irisan bidang luncur
- V : tekanan air pori

2.8.2 Stabilitas Bendungan Terhadap Aliran Infiltrasi

Bendungan dan pondasi harus mampu menahan tekanan yang ditimbulkan oleh infiltrasi udara yang melewati ruang antar material penyusun pondasi.

Membuat jaringan lintasan aliran filtrasi (*seepage-flow net*) pada tubuh bendungan dan pondasi, serta menghasilkan pembentukan garis depresi (*see page line formation*) pada tubuh bendungan.

a. Formasi garis depresi

Pada zona kedap air formasi garis depresi dapat menggunakan metode Cassagrande. Dengan angka permeabilitas vertikalnya (k_v) berbeda dengan angka permeabilitas horizontalnya (k_h) maka deformasi garis depresi dengan

mengurangi koordinat horizontalnya sebesar $\sqrt{k_v/k_h}$ kali. Rumus

yang digunakan adalah :

$$y_o = h \sqrt{k_v/k_h} \left[1 - \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{2h}{d} \right) \right]$$

Dimana :

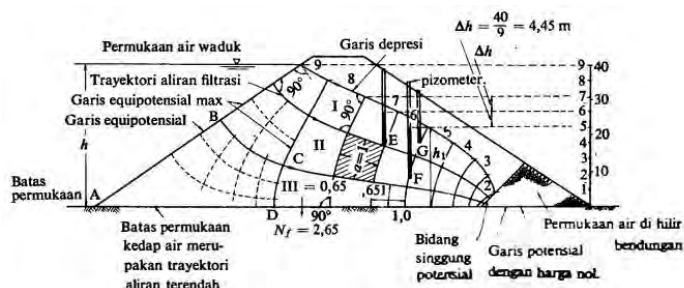
y_o = ordinat (m)

h = jarak vertikal (m)

d = jarak horisontal (m)

b. Jaringan trayektori aliran filtrasi (*seepage flow-net*)

Jaringan trayektori aliran filtrasi dapat menggunakan metode grafis yang diperkenalkan oleh Forchheimer (Forchheimer's diagrammatical solution). Kelemahan metode ini, dimana penggunaannya akan mencapai hasil yang baik, hanya oleh tenaga ahli yang cukup berpengalaman. (Sosrodarsono & Takeda, 2002). Berikut gambar jaringan trayektori aliran filtrasi :



Gambar 14. Jaringan Trayektori (Sosrodarsono & Takeda, 2002)

c. Kapasitas aliran filtrasi

Kapasitas air untuk melewati badan bendungan dan pondasi dari hulu ke hilir dikenal sebagai “kapasitas aliran filtrasi”. Terdapat batas-batas tertentu suatu kapasitas filtrasi bendungan dan apabila kapasitas infiltrasi melewati batas tersebut maka akan terjadi kehilangan air yang cukup besar dan dapat menimbulkan gejala sufosi (piping) serta gejala sembulan (boiling) yang berbahaya pada kestabilan tubuh bendungan.

Besarnya kapasitas filtrasi bendungan dapat dihitung menggunakan jaringan trayektori aliran infiltrasi maupun rumus empiris. Nilai kv dan kh yang berbeda pada material pembentuk tubuh dan pondasi bendungan maka dapat digunakan nilai k yang telah dimodifisir (k').

Nilai k' dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$Q = \bar{A} \sqrt{kh}$$

Dimana :

K : koefisien filtrasi yang dimodifisir

kh : koefisien filtrasi horizontal

kv : koefisien filtrasi vertikal

Besarnya kapasitas filtrasi yang mengalir melalui tubuh dan pondasi bendungan yang didasarkan pada jaringan trayektori aliran filtrasi dengan rumus berikut :

$$Q_f = \frac{K \cdot A \cdot H}{N_f \cdot N_p \cdot L}$$

Dimana :

Q_f : kapasitas aliran filtrasi (kapasitas rembesan)

N_f : angka pembagi dari garis trayektori aliran filtrasi.

N_p : angka pembagi dari garis equi-potensial.

K : koefisien filtrasi

H : tinggi tekanan air total

L : panjang profil melintang tubuh bendungan

d. Gejala-gejala sufosi (*piping*) dan sembulan (*boiling*)

Laju aliran filtrasi pada badan dan pondasi bendungan perlu dibatasi untuk mencegah gejala kecukupan dan letupan yang disebabkan oleh tekanan hidrodinamik yang diakibatkannya.

Kecepatan filtrasi dapat diketahui dengan menggunakan metode jaringan trayektori aliran filtrasi maupun dengan rumus empiris berikut :

$$v = k \cdot \frac{H}{l} \cdot \frac{h^2}{L}$$

Dimana :

v : Kecepatan pada bidang keluarnya aliran filtrasi (lereng hilir bendungan)

k : Koefisien filtrasi

l : Gradien debit

h_2 : Tekanan air rata-rata (perbedaan antara tekanan pada titik peresapan di lereng udik dan titik keluarnya di lereng hilir suatu garis trayektori aliran filtrasi)

l : Panjang rata-rata berkas elemen aliran filtrasi pada bidang keluarnya aliran filtrasi

$$v_x = \frac{1}{\sqrt{2} \bar{A}} \bar{A}$$

v_y : Komponen vertikal dari vektor kecepatan aliran keluar pada permukaan hilir

x : Jarak dari titik tengah (ke arah luar dari median A.B)

Kecepatan aliran keluar lereng bawah yang mempunyai komponen vertikal yang dapat menyebabkan pergerakan butiran material sedimen di permukaan disebut kecepatan kritis. Secara teoritis kecepatan kritis ini dikembangkan oleh Justin dengan rumus :

$$v_c = \sqrt{\frac{w}{\gamma}}$$

Dimana :

w : berat butiran bahan di dalam air.

g : gravitasi

F : luas permukaan yang menampung aliran filtrasi.

γ : berat isi air

2.9 Aplikasi GeoStudio

GeoStudio adalah perangkat lunak (*software*) geoteknik yang digunakan untuk memodelkan stabilitas lereng, deformasi tanah, perpindahan panas dan massa

di tanah atau batuan, dll. Perangkat ini dapat melakukan suatu analisa geoteknik dengan lebih mudah dan cepat apabila dibandingkan dengan menggunakan perhitungan manual.

2.9.1 *Slope/w*

Slope/w merupakan bagian dari aplikasi GeoStudio yang digunakan untuk memodelkan dan menganalisa timbunan dari kemungkinan longsor. Dalam aplikasi ini terdapat banyak metode yang dapat digunakan untuk menganalisa kelongsoran lereng. Program ini memungkinkan untuk menangani prosedur berulang yang melekat pada metode batas keseimbangan dengan mudah yang mengarah ke formulasi matematis yang baik yang mencakup semua gaya antar kolom dengan memenuhi semua persamaan statika. Pada tabel berikut ditampilkan metode yang tersedia pada program GeoStudio serta persamaan statika yang memenuhi masing-masing metode serta ditunjukkan rangkuman gaya antar kolom yang disertakan dalam setiap metode dan hubungan yang diasumsikan antara gaya geser antar kolom dan gaya normal.

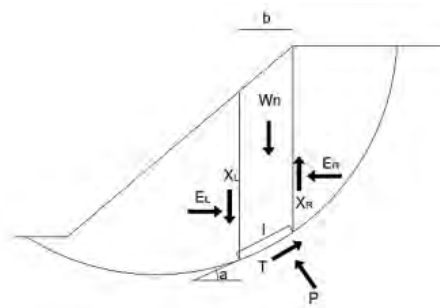
Tabel 8. *Equations of statics satisfied for each method (Seequent Limited , 2023)*

<i>Method</i>	<i>2D</i>	<i>3D</i>	<i>Moment Equilibrium</i>	<i>Force Equilibrium</i>
<i>Ordinary or Fellenius</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>
<i>Bishop Simplified</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>
<i>Jambu Simplified</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>
<i>Spencer</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>
<i>Morgenstern-Price</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>
<i>Corps of Engineers – 1</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>
<i>Corps of Engineers – 2</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>
<i>Lowe-Karafiath</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>
<i>Jambu Generalized</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>
<i>Sarma-vertical columns</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>

Tabel 9. *Intercolumn force characteristic and relationships (Seequent Limited, 2023)*

Method	Intercolumn Normal (E)	Intercolumn Shear (X)	X/E Relationship/Inclination of Resultant
Ordinary Fellenius	No	No	No intercolumn forces
Bishop Simplified	Yes	No	None/Horizontal
Jambu Simplified	Yes	No	None/Horizontal
Spencer	Yes	Yes	Prescribed/constant
Morgenstern-Price	Yes	Yes	User Function/Variable
Corps of Engineers – 1	Yes	Yes	Prescribed/Inclination of a line from crest to toe
Corps of Engineers – 2	Yes	Yes	Prescribed/Inclination of ground surface at top of column
Lowe-Karafiath	Yes	Yes	Prescribed/Average of ground surface and column base inclination
Jambu Generalized	Yes	Yes	Prescribed/Applied line of thrust and moment equilibrium of column
Sarma-vertical columns	Yes	Yes	Prescribed/ $X = x + E \tan \phi'$

Slope/w menggunakan metode *limit equilibrium method* (LEM). Metode ini menggunakan prinsip kesetimbangan gaya. Pada metode ini bidang kelongsoran diasumsikan sebagai bidang berbentuk *circular* dan bidang *non circular*. Gaya yang bekerja pada bidang irisan ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 15. Gaya yang bekerja padang bidang irisan (Seequent Limited, 2023)

2.9.2 *Seep/w*

Bagian dari aplikasi GeoStudio untuk menganalisa rembesan air tanah dan masalah disipasi tekanan air pori. Terdapat beberapa indikator dalam melakukan analisa aliran air pada material pada *seep/w* dijelaskan sebagai berikut :

a. *Material Model*

Model ini untuk menganalisa kemampuan media berpori untuk menyimpan dan mengirimkan air. Transmisi dan penyimpanan properti akan dihitung secara otomatis oleh perangkat lunak, sedangkan properti untuk air diinput oleh pengguna. Pemodelan material dibagi menjadi 2 yaitu :

1) *Saturated Only*

Input material tanah yang bersifat jenuh saja. Dalam kondisi jenuh, kadar air volumetrik setara dengan porositas.

2) *Saturated-Unsaturated*

Input material jenuh-jenuh. Fungsi kadar air volumetrik mencirikan volume air yang disimpan sebagai fungsi dari suction matrik. Jika tekanan udara diasumsikan nol, setara dengan tekanan air pori negatif. Biasanya pemodelan ini digunakan untuk data material penyusun bendungan berupa : zona kedap, filter, timbunan random, riprap, dan lain-lain.

b. *Hydraulic Conductivity Function*

Konduktivitas hidraulik adalah kemampuan tanah untuk melewatkan air, baik dalam kondisi jenuh atau jenuh sebagian. *Hydraulic conductivity* pada tanah jenuh sebagian sangat dipengaruhi oleh perubahan angka pori dan derajat kejenuhan. Besarnya *hydraulic conductivity* pada tanah jenuh sebagian tidaklah konstan, hal ini tergantung pada nilai VWC, dengan demikian dapat dikatakan

bahwa *hydraulic conductivity* tanah jenuh sebagian tergantung pada nilai *suction* tanah. *Hydraulic conductivity* pada tanah jenuh sebagian dapat ditentukan dengan mem-plotkan fungsi dari *matric suction* pada SWCC yang merupakan kurva hubungan antara derajat kejenuhan atau *volumetric water content* dan *matric suction*, dengan menggunakan koefisien permeabilitas pada tanah jenuh (k_{sat}) (Sinarta, 2016).

c. Tekanan Air Pori Negatif (*Suction*)

Suction merupakan selisih antara tekanan udara pori (u_a) dengan tekanan air pori (u_w). *Suction* dapat dianalisis dengan tekanan kapiler (U_c). Nilai tekanan kapiler tergantung pada tegangan permukaan (τ_s) dan jejari kurva R . Hubungan antara tegangan permukaan dan tegangan kapiler dapat dirumuskan dengan persamaan Laplace sebagai berikut :

$$u_c = (u_a - u_w) = \frac{2\bar{A} \cos \bar{A}}{r} = h_c \gamma_w$$

dengan :

u_a : tekanan udara pori (kN/m^2)

u_w : tekanan air pori (kN/m^2)

τ_s : tegangan permukaan air (kN/m^2)

r : jejari kapiler pipa (m)

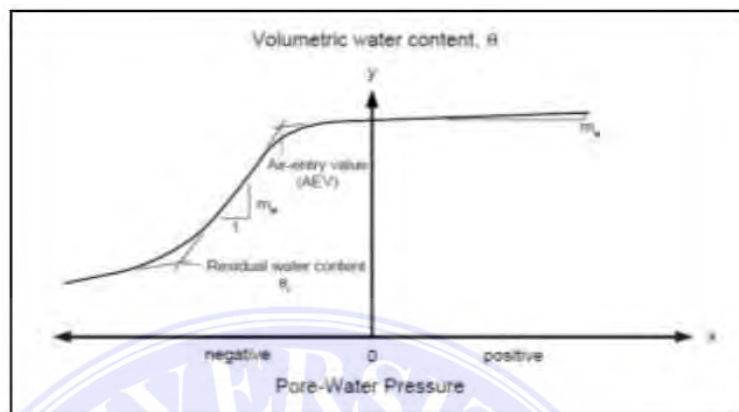
α : sudut kontak ($^\circ$)

h_c : tinggi kapiler (m)

d. *Volumetric Water Content*

Volumetric Water Content function menggambarkan sisa volume rongga yang terisi air sebagai aliran air tanah (Sinarta, 2016). Nilai *volumetric water content* tergantung pada tiga hal yaitu *air entry value (AEV)*, kemiringan grafik

tekanan air pori (m_w) dan *residual water content* (θ_r) atau derajat kejenuhan (S). Ditunjukkan pada gambar berikut :



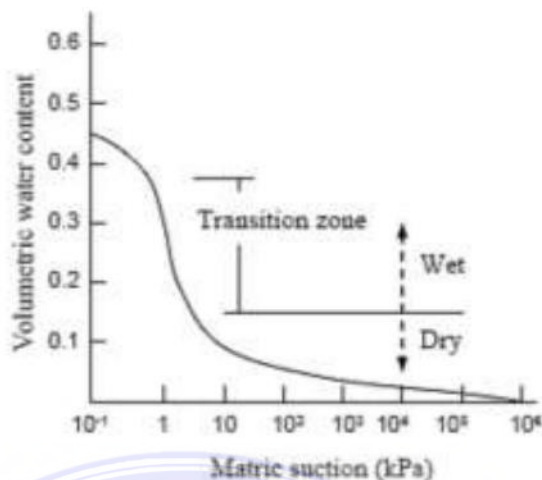
Gambar 16. *Volumetric water content functions* ((Sinarta, 2016)

Menurut (Sinarta, 2016) faktor yang paling mempengaruhi *volumetric water content* adalah ukuran butir tanah dan distribusi ukuran butirnya. *Suction* rendah terjadi pada tanah jenuh, belum ada air yang keluar dari pori-pori. Seiring dengan peningkatan *suction*, pada suatu nilai *suction* tertentu, air mulai keluar dari pori-pori tanah.

e. *Soil Water Characteristic Curve (SWCC)*

Soil Water Characteristic Curve (SWCC) merupakan hubungan antara potensial air tanah dan *gravimetric water content*. *Volumetric water content* or *degree of saturation*. SWCC merupakan kurva yang menggambarkan hubungan air dalam tanah yang mempengaruhi perubahan *suction* tanah. SWCC diartikan sebagai *retention curve* atau *volumetric water content curve* yang menggambarkan kemampuan tanah untuk menyimpan dan melepaskan air (Sinarta, 2016). Kurva SWCC untuk pasir ditunjukkan pada gambar berikut

:



Gambar 17. *Soil-water characteristic curve for sandy soil* (Sinarta, 2016)

f. *Boundary condition*

Kondisi batas ini umumnya mengambil bentuk variabel dependen (kondisi batas tipe 1) atau gradien variabel dependen (kondisi batas tipe 2) normal ke batas.

Beberapa fungsi berikut :

1) *Potential Seepage*

Tinjauan rembesan yang digunakan jika permukaan bebas yang dapat berkembang sepanjang batas.

2) *Total Head*

Ketinggian air dalam topografi rendah atau cekungan dapat bervariasi dari waktu ke waktu karena aliran air dipermukaan tanah menyebabkan ketinggian air berubah.

3) *New Boundary conditions*

Berupa inputan data Muka air banjir, Elevasi setinggi mercu, dan surut cepat.

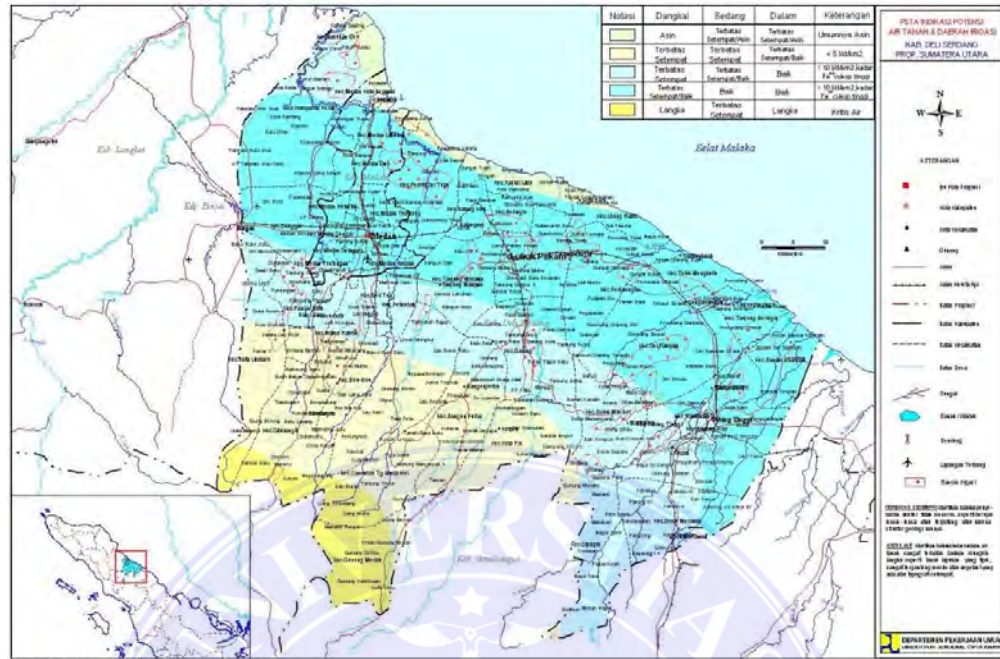
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Secara administratif Bendungan Lau Simeme terletak di Desa Kuala Dekah Kecamatan Sibiru-Biru Kabupaten Deli Serdang. Secara geografis dengan menggunakan koordinat aplikasi *google earth* bendungan Lau Simeme terletak pada *latitude* $3^{\circ}21'0.45''N$ dan *longitude* $98^{\circ}38'57.54''E$. Letak koordinat dan peta administratif Bendungan Lau Simeme ditampilkan pada gambar berikut :



Gambar 18. Lokasi Bendungan Lau Simeme (*Google Earth, 2023*)



Gambar 19. Peta Lokasi Administratif Bendungan Lau Simeme (BWS Sumatera II, 2023)

3.2 Gambaran Proyek

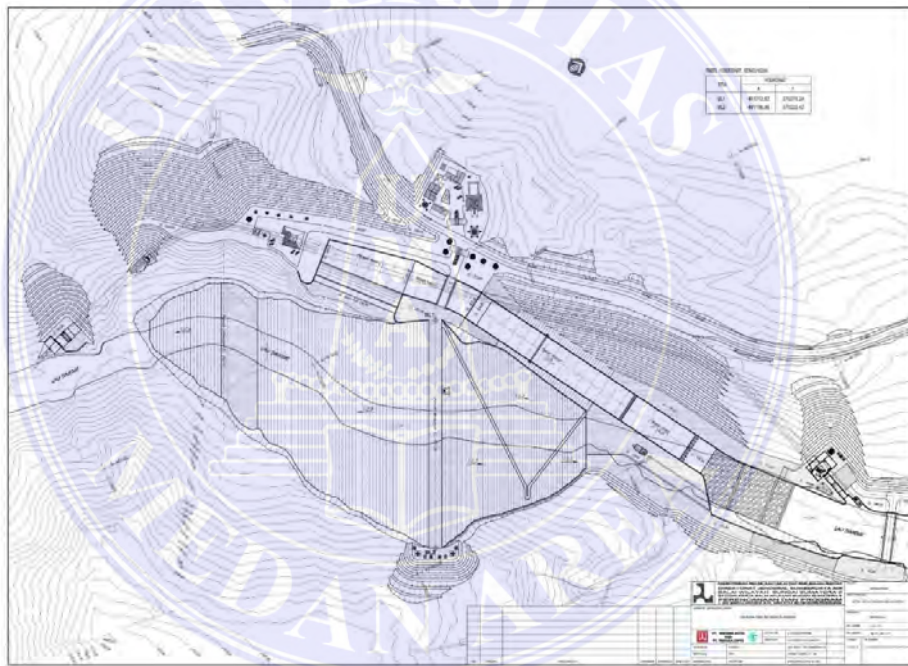
Bendungan Lau Simeme direncanakan dengan tipe bendungan zonal dengan timbunan batu dengan tujuan mampu mereduksi banjir hingga 68.17 m³/dt, penyimpanan air baku sebesar 3.00 m³/dt, dan PLTA dengan kapasitas 2.9 MW.

Data teknis bendungan berikut :

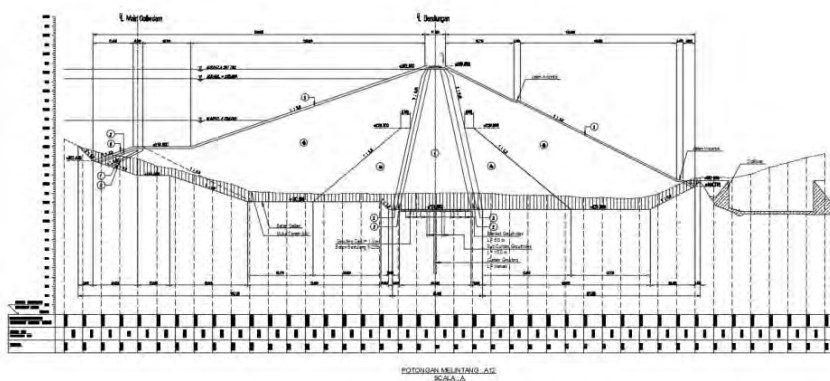
- a. Elevasi Puncak Bendungan : +253.50 m
- b. Elevasi Muka Air Normal : +246,80 m
- c. Elevasi Muka Air Sungai : +191,00 m
- d. Panjang Bendungan : 960 m
- e. Tinggi Bendungan : 77 m
- f. Volume Tubuh Bendungan : 1,63 Juta m³
- g. Debit Desain Q₂₅ : 542.41 m³/dt

- h. Debit Desain Q_{100} : 697.78 m³/dt
 i. Debit Desain Q_{1000} : 1024.25 m³/dt
 j. Debit Desain Q_{PMF} : 1963.78 m³/dt

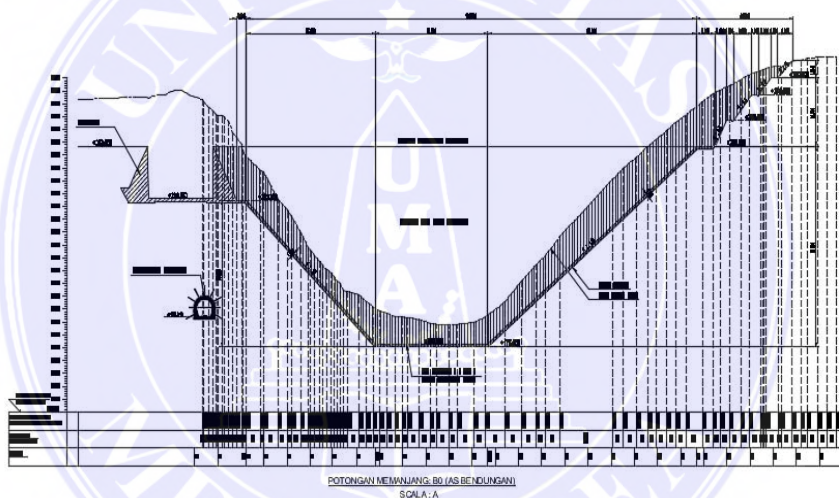
Site plan merupakan gambar yang menunjukkan situasi dan gambaran proyek. Gambar potongan melintang tubuh bendung merupakan gambar yang menunjukkan rencana potongan tubuh bendungan. *Site plan* bendungan Lau Simeme, potongan memanjang bendungan, potongan melintang bendungan, serta gambar informasi timbunan bendungan ditunjukkan pada gambar berikut :



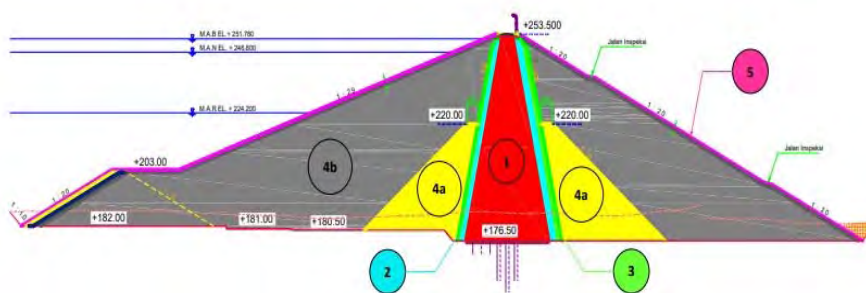
Gambar 20. *Site Plan* Bendungan Lau Simeme (BWS Sumatera II, 2023)



Gambar 21. Potongan Melintang Tubuh Bendungan (BWS Sumatera II, 2023)



Gambar 22. Potongan Memanjang Tubuh Bendungan (BWS Sumatera II, 2023)



Gambar 23. Informasi Material Timbunan Bendungan (BWS Sumatera II, 2023)

3.3 Pengumpulan Data

Data perencanaan yang digunakan dalam analisa dan perhitungan merupakan data sekunder yang terdiri dari peta topografi, data hidrologi, gambar rencana melintang dan memanjang bendungan, dimensi bendungan, serta data spesifikasi material timbunan.

1. Peta Topografi

Peta topografi merupakan peta yang memuat layout bendungan. Peta ini digunakan untuk mendapatkan gambaran letak kedudukan bendungan beserta bangunan bendungan lainnya.

2. Data Hidrologi

Data hidrologi yang digunakan yaitu kebutuhan air dan tampungan bendungan. Data hidrologi juga digunakan untuk perhitungan penelusuran banjir rencana. Hasil penelusuran banjir akan digunakan untuk mendapatkan dimensi dari tubuh bendungan.

3. Dimensi bendungan

Dimensi bendungan didapatkan dari hasil perhitungan hidrologi.

4. Gambar melintang dan memanjang tubuh bendungan

Gambar melintang dan memanjang tubuh bendungan memuat data dimensi bendungan serta rencana material timbunan tubuh bendungan.

5. Spesifikasi material timbunan tubuh bendung

Spesifikasi material berupa data parameter tanah laboratorium maupun hasil uji *trial embankment* yang memuat karakteristik dari material penyusun rencana tubuh bendungan. Berikut data spesifikasi material inputan yang diperlukan :

Tabel 10. Data Inputan Material Tubuh Bendung Dalam Aplikasi

No	Kriteria Desain	Satuan	Material					
			<i>Lempung Quarry</i>	<i>Galian Spillway</i>	<i>Filter Halus</i>	<i>Filter Kasar</i>	<i>Rockfill</i>	<i>Rip- Rap</i>
1	<i>Input Seep W</i>							
1.1	<i>Hydrolic</i>							
-	<i>Material Model</i>		<i>Saturated/Unsaturated</i>					
-	<i>Ky/Kx Ratio</i>							
1.2	<i>Vol Water content function</i>							

Lanjutan tabel 10. Data Inputan Material Tubuh Bendung Dalam Aplikasi

No	Kriteria Desain	Satuan	Material					
			<i>Lempung Quarry</i>	<i>Galian Spillway</i>	<i>Filter Halus</i>	<i>Filter Kasar</i>	<i>Rockfill</i>	<i>Rip- Rap</i>
-	<i>Estimation method</i>		<i>Sample Function</i>					
-	<i>Saturated WC</i>	<i>%</i>						
1.3	<i>Hydrolic Conductivity Function</i>							
-	<i>Type</i>		<i>Hyd K Data Point</i>					
-	<i>Estimation method</i>		<i>Van Genuchten</i>					
-	<i>Saturated Kx</i>	<i>(m/s)</i>						
2	<i>Input Slope W</i>							
2.1	<i>Slope stability</i>							
-	<i>Material Model</i>		<i>Mohr Coulumb</i>					
-	<i>Unit Weight</i>	<i>kN/m³</i>						
-	<i>Cohession</i>	<i>kPA</i>						
-	<i>Phi</i>	<i>Derajat</i>						
-		<i>°</i>						

3.4 Analisa dan Perhitungan

3.4.1 Desain

Analisa dan perhitungan dilakukan terhadap 4 desain pemodelan yaitu pemodelan I : tubuh bendung dengan inti material *clay borrow area* hulu

bandungan, pemodelan II : tubuh bendung dengan inti material *clay borrow area* hilir bendungan, pemodelan III : tubuh bendung dengan inti material *clay borrow area* hulu dengan lapisan *geomembrane* antara *filter* dan *transisi* hulu bendung, pemodelan IV : tubuh bendung dengan inti material *clay borrow area* hilir dengan lapisan *geomembrane* antara *filter* dan *transisi* hulu bendung.

3.4.2 Pemodelan

1. Desain tubuh bendung pada setiap pemodelan dimodelkan menggunakan program komputer yaitu GeoStudio 2022.1 version 11.4.2.250. Desain bendung dimodelkan dengan cara menginput titik koordinat yang membentuk tubuh bendung.
2. Spesifikasi material penyusun tubuh bendungan dimodelkan sesuai dengan desain *eksisting* dan alternatif yang ada. Parameter material yang digunakan menggunakan data yang diperoleh dari hasil penyelidikan tanah yang didapatkan dari perusahaan dan instansi terkait dan material *geomembrane* menggunakan spesifikasi dari jurnal yang sesuai.
3. Kondisi Pembebanan
Pembebanan desain tubuh bendung menggunakan 5 kondisi pembebanan berikut :
 - a. Pada saat bendung selesai dibangun.
 - b. Pada saat elevasi Muka Air Banjir (MAB)
 - c. Pada saat elevasi Muka Air Normal
 - d. Pada saat elevasi Muka Air Rendah

- e. Pada kondisi terjadinya penurunan elevasi secara tiba-tiba Muka Air Normal – Muka Air Rendah

3.4.3 Analisa

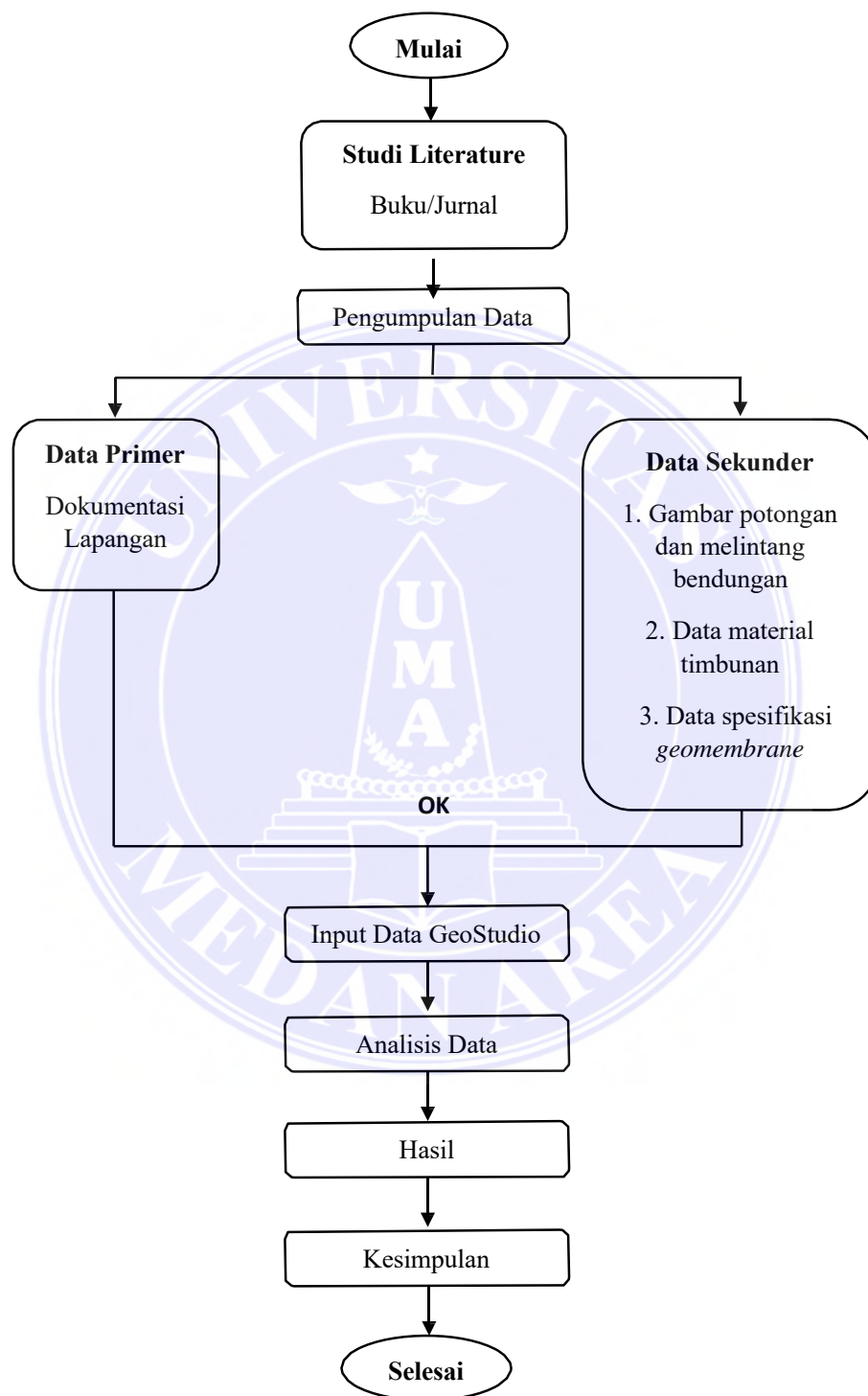
Setelah pemodelan desain, input nilai material penyusun, serta kondisi pembebanan dilakukan maka dilakukan analisa terhadap longsor menggunakan *slope/w* dan rembesan menggunakan *seep/w* yang terdapat pada program GeoStudio.

Longsor dan rembesan yang terjadi pada tubuh bendung dianalisa pada bagian hulu dan hilir bendungan pada 5 kondisi pembebanan. Hasil analisa dan perhitungan berupa :

1. *Safety factor (sf)* pada hulu dan hilir tubuh bendung pada setiap pemodelan pada kondisi sesaat setelah bendung selesai dibangun, kondisi dengan elevasi muka air banjir, elevasi muka air normal, elevasi muka air rendah dan kondisi pada saat bendung mengalami penurunan muka air secara tiba-tiba dari kondisi muka air normal ke kondisi muka air rendah.
2. Nilai debit aliran rembesan pada hilir tubuh bendungan.

3.5 Diagram Alur Pekerjaan

Diagram alur pekerjaan ditunjukkan sebagai berikut :



Gambar 24. Kerangka Berpikir (Peneliti, 2023)

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Pada pemodelan I angka keamanan kritis terjadi pada hilir bendung dengan kondisi muka air banjir yaitu 2.407. Pada pemodelan II angka keamanan kritis terjadi pada hilir bendung dengan kondisi muka air normal yaitu 2.443. Pada pemodelan III angka keamanan kritis terjadi pada hilir bendung dengan kondisi muka air banjir yaitu 2.459. Pada pemodelan IV angka keamanan kritis terjadi pada hilir bendung pada kondisi muka air banjir yaitu 2.486. Pada setiap pemodelan angka keamanan kritis yang terjadi masih lebih tinggi dari kriteria penerimaan yang diberikan yaitu 1.5 sehingga setiap pemodelan aman terhadap longsoran.
2. Pada pemodelan I debit rembesan maksimum yang terjadi di hilir pada kondisi muka air normal yaitu $0.0019 \text{ m}^3/\text{dt}/\text{m}$. Pada pemodelan II debit rembesan maksimum yang terjadi di hilir pada kondisi muka air banjir yaitu $0.00140 \text{ m}^3/\text{dt}/\text{m}$. Pada pemodelan III debit rembesan maksimum yang terjadi di hilir pada kondisi muka air banjir yaitu $0.00170 \text{ m}^3/\text{dt}/\text{m}$. Pada pemodelan IV debit rembesan maksimum yang terjadi di hilir pada kondisi muka air banjir yaitu $0.00170 \text{ m}^3/\text{dt}/\text{m}$.
3. Dari hasil analisa menggunakan aplikasi GeoStudio pada setiap pemodelan penggunaan material *geomembrane* pada pemodelan III dan IV dan dibandingkan dengan pemodelan I dan II tidak berpengaruh signifikan terhadap peningkatan angka keamanan terhadap longsoran.

4. Dari hasil analisa menggunakan aplikasi GeoStudio pada setiap pemodelan penggunaan material *geomembrane* pada pemodelan III dan IV dan dibandingkan dengan pemodelan I dan II berpengaruh signifikan terhadap besarnya debit rembesan yang terjadi pada hilir bendung, penggunaan material *geomembrane* dapat mempengaruhi profil rembesan yang terjadi. Debit yang terjadi pada hilir bendungan pada pemodelan dengan penggunaan *geomembrane* lebih kecil. Debit maksimum yang terjadi pada tubuh bendung pada pemodelan menggunakan *geomembrane* aman terhadap debit ijin sedangkan pada pemodelan tanpa *geomembrane* tidak aman terhadap rembesan. Dari hasil analisa didapatkan bahwa pemodelan III memiliki stabilitas yang paling baik terhadap rembesan ditinjau terhadap debit maksimum dan debit hilir yang terjadi.

5.2 Saran

1. Pemodelan dengan mengubah letak *geomembrane* dan mengkombinasikan dengan material dengan nilai permeabilitas yang lebih tinggi perlu dilakukan untuk mendapatkan pengaruh material *geomembrane* yang lebih signifikan.
2. Analisis dengan perubahan dimensi zona kedap air perlu dilakukan untuk mengamati profil rembesan dan stabilitas bendung lebih lanjut.
3. Perlu dilakukan kalibrasi aplikasi (software) dengan membandingkan perhitungan manual.

DAFTAR PUSTAKA

- Affandi, D. (2014). Kriteria Material Konstruksi Untuk Bendungan Urugan (Studi Kasus Bendungan Sindangheula). *Jurnal Teknik Hidraulik*, 5(2), 165–180. <http://jurnalth.pusair-pu.go.id/index.php/JTH/article/view/308>
- Bowles, J. E. (1986). *Sifat-sifat fisis dan geoteknis tanah : (mekanika tanah)* (alih bahasa oleh J. K. Hainim (Ed.)).
- Darwis. (2018). *Dasar-dasar Mekanika Tanah* (A. Kodir (Ed.); Issue March).
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik*. In *Penerbit Erlangga*.
- Demirdogen, S. (2018). *Numerical Analysis of Leakage through Defective Geomembrane Liners in Embankment Dams*. *October*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26927.76962>
- Müller, W. W. (Ed.). (2007). *HDPE Materials and Geomembrane Manufacture BT - HDPE Geomembranes in Geotechnics* (pp. 11–33). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-37288-2_2
- Natalia Yuliana Margaretha, I Made Kamiana, & Dwi Anung Nindito. (2020). Studi Analisis Dimensi Dan Stabilitas Tubuh Bendungan Urugan Beringin Sila. *Jurnal Teknika: Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang Keteknikan*, 4(1), 81–89. <https://doi.org/10.52868/jt.v4i1.2651>
- Putra, T. G. S., Aribudiman, I. N., & Juliawan, G. R. (2019). Analisis Stabilitas Lereng Pada Bendungan Titab. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 20(1), 1689–1699.

- Ramadani, A., & Warsito, A. R. (2020). *Studi Perencanaan Dimensi Tubuh Bendungan Pada Bendungan Logung Kabupaten Kudus*. 8(1), 54–62.
- Sinarta, I. N. (2016). Stabilitas Lereng Tanah Tak Jenuh (Soil Mechanics On Unsaturated Soil). *PADURAKSA*, 5, 31–42.
- Sosrodarsono, S., & Takeda, K. (2002). *Bendungan Type Urugan* (4th ed.). Pradnya Paramita.
- Victor Anton Sutresno, Endah Mochtar, N., & Mochtar, I. B. (2022). Studi Perbandingan Desain Inti Bendung Dengan Pemakaian Material Alternatif Untuk Optimasi Biaya. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 20, 3.
- Dewi, S., Septarini, B., Prihandono, F. X., Herawati, F. A., & Hasibuan, S. (2021). REVITALISASI MUSEUM DOKTER YAP. *Jurnal Arsitektur KOMPOSISI*, 15(1), 27-34.
- Hasibuan, S. A. R. S., Kurniati, D., & Sari, M. P. (2021). Desain dan Analisis Flat Slab dengan Software Matlab. *Teknika*, 16(2), 88-96.
- Dayana, I., & Sari, M. P. (2023). Workshop Penulisan Buku Ajar Bagi Dosen Akademi Maritim Belawan Medan. *Center of Knowledge: Jurnal Pendidikan Dan Pengabdian Masyarakat*, 8-13.
- Sari, M. P. (2018). Pembuatan dan Karakterisasi Genteng Polimer dari Lateks, Pasir dan Aspal dengan Polipropilena (PP) sebagai Perekat dengan Menggunakan Metode Hot Press (Doctoral dissertation, Universitas Sumatera Utara).
- Sari, N. P. (2021). Analisis Kehilangan Gaya Prategang Girder Pada Jembatan

dissertation, Universitas Medan Area).

Hermansyah, H. Penggunaan Link Slab untuk Perbaikan Jembatan Komposit. *Jurnal Teknik Sipil Bandar Lampung*, 12(1), 1247-1257.

Hermansyah, H. (2019). KAJIAN KERUSAKKAN PADA KONSTRUKSI BANGUNAN BASEMENT COOLING WATER PUMP (CWP) PLTU PEMBANGKITAN SUMATERA UTARA BAGIAN UTARA SEKTOR PEMBANGKITAN BELAWAN. *JURNAL ILMIAH TEKNIK SIPIL*, 9(1), 13-21.

Akbar, A., Flacke, J., Martinez Martin, J., & FAM van Maarseveen, M. (2020, June). A collaborative framework to improve public participation practice. In *Proceedings of the 16th Participatory Design Conference 2020-Participation (s) Otherwise-Volume 2* (pp. 133-137).

Wahyuni, S., Akbar, A., Khaliq, A., & Akbar, A. (2023). WEB-BASED APPLICATION FOR SEA PRODUCTS TRADING TO INCREASE FISHERMEN'S INCOME IN SECANGGAN VILLAGE. *PROSIDING UNIVERSITAS DHARMAWANGSA*, 3(1), 736-745.

Akbar, A. (2021). Collaborative spatial learning for improving public participation practice in Indonesia.

Fahmi, A. M., Irwan, I., & Amsuardiman, A. (2021). Analisis Pengaruh Aspal Modifikasi Dengan Penambahan Abu Cangkang Sawit Terhadap Kinerja Perkerasan Aspal. *Journal Of Civil Engineering Building And Transportation*, 5(2), 64-68.

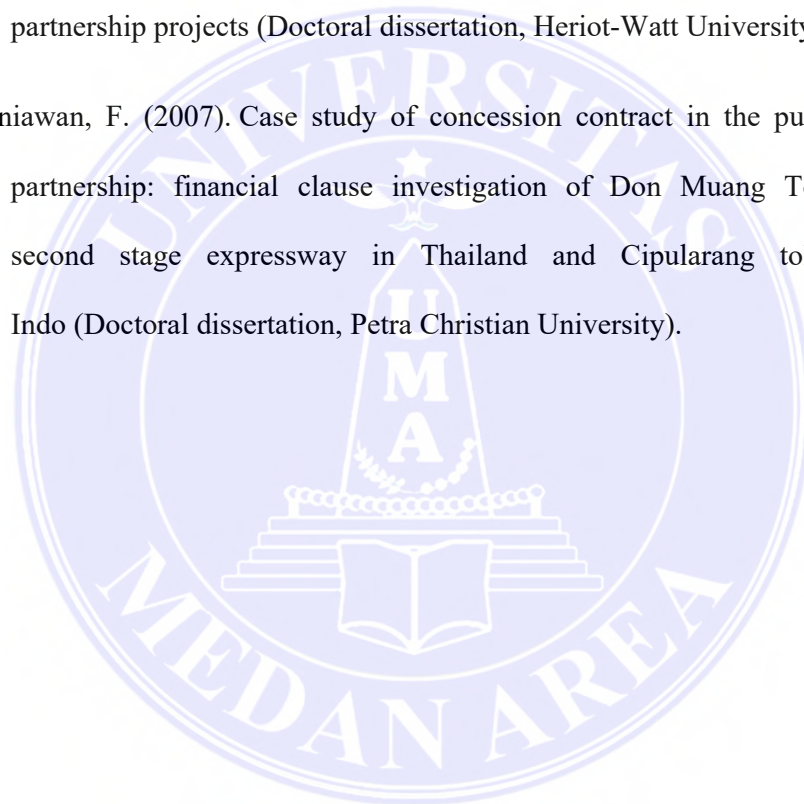
Siregar, C. R., & Iskandar, R. (2012). Analisa Daya Dukung Pondasi Tiang

Pancang Secara Analitis Pada Proyek GBI Bethel Medan. *Jurnal Teknik Sipil USU*, 1(2).

Kurniawan, F. (2010, November). A review: Exploring stakeholders' expectations from PFI financial modelling at different stages. In *PMI India Conference* (pp. 19-21).

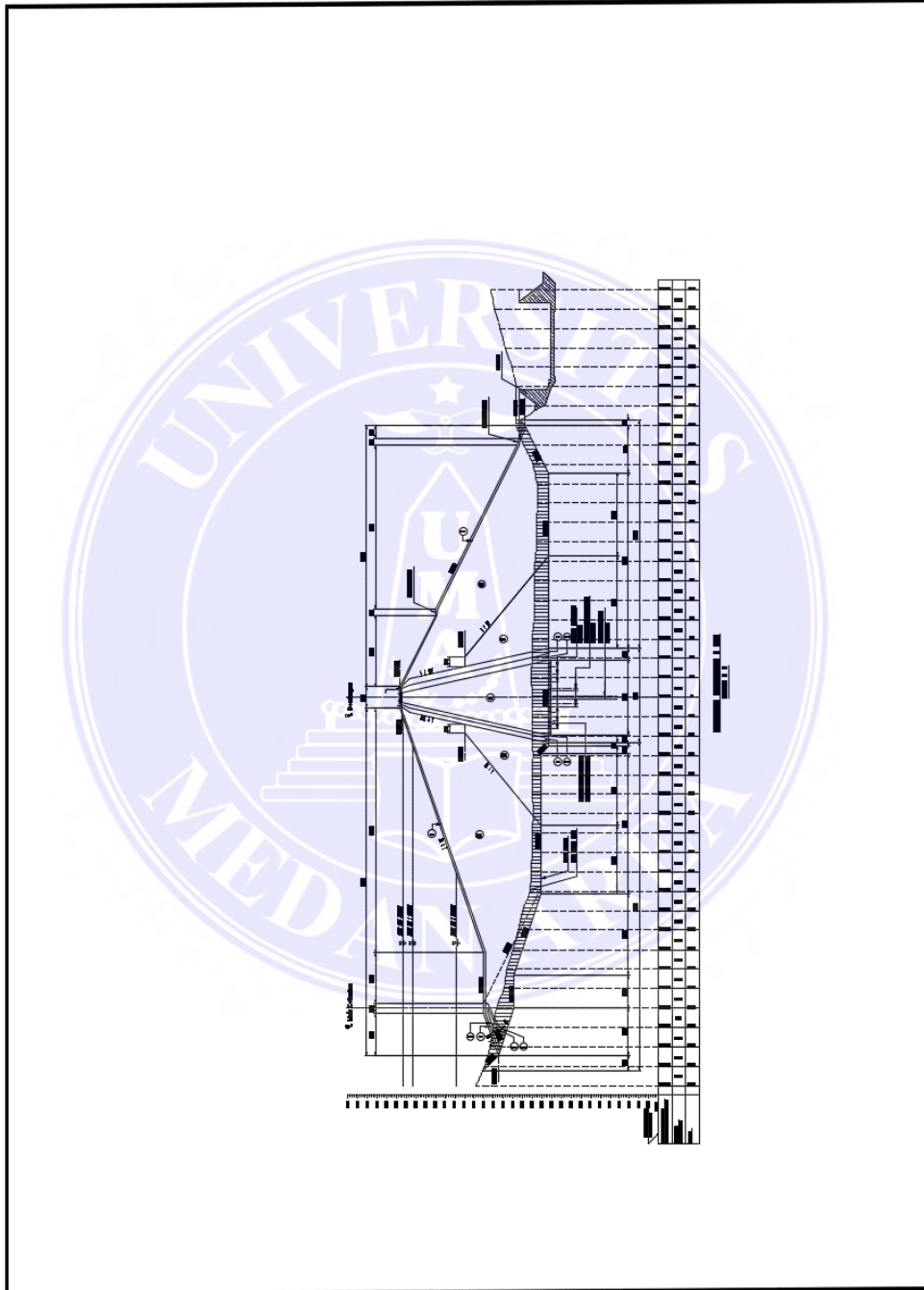
Kurniawan, F. (2013). An integrated project evaluation tool for public-private partnership projects (Doctoral dissertation, Heriot-Watt University).

Kurniawan, F. (2007). Case study of concession contract in the public private partnership: financial clause investigation of Don Muang Tollway and second stage expressway in Thailand and Cipularang toll road in Indo (Doctoral dissertation, Petra Christian University).



LAMPIRAN

Lampiran 1. Gambar Potongan Melintang Tubuh Bendung



Lampiran 2. Gambar Potongan Memanjang Tubuh Bendung

