TUGAS AKHIR

ANALISIS PENYEBAB TERJADINYA KELONGSORAN PADA TUBUH BENDUNGAN (STUDI KASUS BENDUNGAN PELANA PASIR GOMBONG TIMUR PADA BENDUNGAN IR. H. DJUANDA JATILUHUR)

Diajukan untuk memenuhi syarat akademis dalam menyelesaikan Pendidikan Tingkat Sarjana (Strata-1) Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Sangga Buana (USB-YPKP)

Disusun Oleh:

Lukman Nurrahman

2112221029

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SANGGA BUANA

BANDUNG

2026

LEMBAR PERSEMBAHAN

Dengan nama Allah yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, segala puji dan syukur saya panjatkan ke hadirat Allah Azza Wa Jalla atas limpahan rahmat, nikmat, serta karunia-Nya, sehingga penulisan Tugas Akhir yang berjudul Analisis Penyebab Terjadinya Kelongsoran Pada Tubuh Bendungan (Studi Kasus Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur pada Bendungan Ir. H. Djuanda Jatiluhur), dapat diselesaikan dengan baik.

Dengan penuh kerendahan hati, karya ini saya persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua saya tercinta, atas doa, kasih sayang, dukungan, dan pengorbanan yang tiada henti
2. Saudara-saudara saya yang selalu memberikan semangat dan motivasi
3. Peran dosen dan pembimbing yang dengan tulus membimbing, memberikan ilmu, serta arahan yang berharga.
4. Rekan-rekan seperjuangan di Teknik Sipil Universitas Sangga Buana, yang selalu memberikan dukungan dan kebersamaan selama masa perkuliahan.
5. Semua pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam penyusunan tugas akhir ini.

Semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pengemban ilmu pengetahuan dan menjadi amal jariyah bagi semua yang terlibat di dalamnya.

Bandung, Februari 2026



Lukman Nurrahman

NPM. 2112221029

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

ANALISIS PENYEBAB TERJADINYA KELONGSORAN PADA TUBUH BENDUNGAN (STUDI KASUS BENDUNGAN PELANA PASIR GOMBONG TIMUR PADA BENDUNGAN Ir. H. DJUANDA JATILUHUR)

Disusun Oleh:

Lukman Nurrahman

2112221029

Naskah Tugas Akhir ini diperiksa dan disetujui sebagai kelengkapan persyaratan kelulusan, guna memperoleh gelar sarjana Teknik Sipil pada Program Studi Teknik Sipil Universitas Sangga Buana YPKP Bandung

Menyetujui dan Mengesahkan

Dosen Pembimbing

Dwi Haryono Aji Wibowo, S.T., M.T.

NIP. 432.200.159

Mengetahui:

Ketua Program Studi Teknik Sipil

Universitas Sangga Buana

Muhammad Syukri, S.T., M.T.

NIP. 432.200.200

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Tugas Akhir ini telah diterima dan disahkan sebagai salah satu syarat akademis dalam menyelesaikan Pendidikan Tingkat Sarjana (Strata-1) Teknik Sipil – Fakultas Teknik Universitas Sangga Buana (USB-YPKP)

MENGESAHKAN,

Program Studi Sarjana Teknik SIpil Fakultas Teknik Universitas Sangga Buana YPKP Bandung

Penguji 1	Penguji 2
Ir. Heri Sismoro, S.T., M.T.	**Ir. Yanti Irawati, S.T., M.T.**
NIP. 432.200.197	**NIP. 432.200.198**

PERNYATAAN KEABSAHAN

Dengan ini penulis menyatakan bahwa dalam Tugas Akhir ini yang berjudul "Analisis Penyebab Terjadinya Kelongsoran Pada Tubuh Bendungan (Studi Kasus Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur Pada Bendungan Ir. H. Djuanda Jatiluhur)" tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang pengetahuan penulis juga tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam Tugas Akhir ini di buat oleh penulis sendiri.

Apabila pernyataan saya ternyata tidak benar, penulis bersedia menerima hukuman atau konsekuensi sesuai hukum yang berlaku.

Bandung, Februari 2026



Lukman Nurrahman

NPM. 2112221029

HALAMAN HAK CIPTA

Mahasiswa S1

“ANALISIS PENYEBAB TERJADINYA KELONGSORAN PADA TUBUH BENDUNGAN: (STUDI KASUS BENDUNGAN PELANA PASIR GOMBONG TIMUR PADA BENDUNGAN Ir. H. DJUANDA JATILUHUR)

Oleh:

Lukman Nurrahman

Naskah Tugas Akhir yang diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Fakultas Teknik

©Lukman Nurrahman 2026

Universitas Sangga Buana – YPKP

2026

Hak Cipta dilindungi Undang – Undang

Tugas Akhir ini tidak boleh diperbanyak Seluruhnya atau Sebagian, dengan dicetak ulang, fotokopi, dan atau cara lainnya tanpa izin dari penulis.

ABSTRAK

Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur merupakan bagian dari sistem Bendungan Ir. H. Djuanda yang berfungsi sebagai bangunan pengaman dalam pengendalian limpasan dan rembesan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi perilaku rembesan dan kestabilan lereng hulu pada berbagai kondisi hidraulik. Analisis dilakukan menggunakan *SEEP/W* (*steady-state*) untuk rembesan dan *SLOPE/W* dengan metode *Bishop Simplified* untuk stabilitas lereng, berdasarkan parameter tanah hasil uji laboratorium dan data teknis pendukung.

Hasil menunjukkan debit rembesan masih dalam batas aman (<0,1% kapasitas tampungan), sehingga secara hidraulik bendungan tergolong terkendali. Namun, faktor keamanan lereng berkisar antara 1,302–1,968 tergantung kondisi muka air. Kondisi eksisting dan kering memenuhi kriteria (FS ≥ 1,5), sedangkan kondisi muka air normal dan tinggi akibat hujan ekstrem berada pada tingkat mendekati kritis hingga kritis, dengan skenario muka air tinggi sebagai kondisi paling rentan dan selaras dengan kejadian longsor Februari 2021.

Temuan ini menegaskan bahwa kenaikan muka air dan peningkatan kejenuhan tanah berpengaruh signifikan terhadap penurunan stabilitas lereng, sehingga diperlukan pengelolaan muka air waduk, optimalisasi drainase, dan pemantauan tekanan air pori secara berkala untuk meningkatkan keselamatan bendungan.

Kata kunci: bendungan urugan, rembesan, stabilitas lereng, faktor keamanan.

ABSTRACT

The Pasir Gombong Timur Saddle Dam is part of the Ir. H. Djuanda Jatiluhur Dam system, which functions as a structural safety barrier to control runoff and seepage. This study aims to assess seepage behavior and upstream slope stability under various hydraulic conditions. Analysis was conducted using SEEP/W (steady-state) for seepage and SLOPE/W using the Bishop Simplified method for slope stability, based on soil parameters from laboratory tests and supporting technical data.

The results indicate that the seepage discharge remains within safe limits (<0.1% of storage capacity), thus the dam is hydraulically controlled. However, the slope safety factor ranges from 1.302 to 1.968 depending on air surface conditions. Existing and dry conditions meet the criteria (FS ≥ 1.5), while normal and high water levels due to extreme rainfall are at near-critical to critical levels, with the high water level scenario being the most vulnerable and consistent with the February 2021 landslide.

These findings confirm that rising water levels and increased soil saturation significantly reduce slope stability, necessitating reservoir level management, drainage optimization, and regular pore water pressure monitoring to enhance dam safety.

Keywords: embankment dam, seepage, slope stability, safety factor.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis haturkan ke hadirat Allah SWT, karena hanya dengan limpahan rahmat, taufik, dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul Analisis Penyebab Terjadinya Kelongsoran Pada Tubuh Bendungan (Studi Kasus Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur pada Bendungan Ir. H. Djuanda Jatiluhur). Penyusunan tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sangga Buana, Bandung.

Dalam proses penyusunan karya ilmiah ini, penulis sepenuhnya menyadari bahwa keberhasilan penyelesaian tugas akhir bukanlah hasil dari usaha pribadi semata, melainkan juga berkat dukungan, bantuan, serta bimbingan yang diberikan oleh berbagai pihak. Oleh sebab itu, pada kesempatan yang berbahagia ini, penulis dengan penuh rasa hormat dan ketulusan ingin menyampaikan apresiasi dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas limpahan rahmat karunia, kelancara dan kemudahan pada setiap kegiatan dalam penulisan Tugas Akhir.
2. Kedua orang tua tercinta atas doa, kasih saying, serta dukungan moral maupun materil yang tidak pernah berhenti diberikan.
3. Dr. Didin Saepudin, S.E., M.Si., selaku Rektor Universitas Sangga Buana YPKP - Bandung.
4. Bapak Dr. Teguh Nurhani Suharno, M.T., Selaku Wakil Rektor I Universitas Sangga Buana YPKP Bandung.
5. Bapak Assoc. Prof. Dr. Bambang Susanto, S.E., M.Si., selaku Wakil Rektor I Universitas Sangga Buana YPKP - Bandung.
6. Dr. Nurhaeni Sikki, S.AP., M.AP, Selaku Wakil Rektor III Universitas Sangga Buana YPKP Bandung.
7. Bapak Assoc, Prof. Slamet Risnanto, S.T., M.Kom.,Ph.D, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Sangga Buana YPKP - Bandung.
8. Muhammad Syukri, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas Sangga Buana YPKP – Bandung

9. Drs. Rosadi, M.T. sebagai Wali Dosen Program Studi Teknik Sipil 2022 Universitas Sangga Buana YPKP – Bandung..
10. Dwi Haryono Aji Wibowo, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan bimmbingan dan nasehat-nasehat dalam penyusunan laporan Tugas Akhir di Universitas Sangga Buana YPKP.
11. Seluruh Bapak/Ibu Dosen di Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sangga Buana YPKP Bandung.
12. Teman-teman seperjuangan di Teknik Sipil Universitas Sangga Buana yang selalu memberikan semangat dan kebersamaan selama masa perkuliahan.
13. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan seluruhnya yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa tugas akhir ini masih memiliki berbagai keterbatasan dan belum dapat dikatakan sempurna. Oleh karena itu, penulis dengan tulus membuka diri terhadap kritik serta saran yang bersifat membangun, sebagai bahan perbaikan dan penyempurnaan di masa mendatang. Besar harapan penulis, karya ilmiah ini dapat memberikan manfaat nyata, khususnya dalam pengembangan ilmu teknik sipil, serta menjadi kontribusi pemikiran yang bermanfaat bagi pihak-pihak yang memiliki kepentingan di bidang ini.

Bandung, Februari 2026



Lukman Nurrahman

NPM 2112221029

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSEMBAHAN ..... **i**
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR ..... **ii**
PERNYATAAN KEABSAHAN ..... **iv**
HALAMAN HAK CIPTA ..... **v**
ABSTRAK ..... **vi**
ABSTRACT ..... **vii**
KATA PENGANTAR ..... **viii**
DAFTAR ISI ..... **x**
DAFTAR GAMBAR ..... **xiii**
DAFTAR TABEL ..... **xv**
DAFTAR LAMPIRAN ..... **xvi**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Identifikasi Masalah 2
1.3 Rumusan Masalah 2
1.4 Tujuan Penelitian 3
1.5 Manfaat Penelitian 3
1.6 Batasan Masalah 4
1.6.1 Ruang Lingkup Lokasi 4
1.6.2 Populasi dan Sampel Data 4
1.7 Sistematika Penulisan 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA **6**
2.1 Konsep Umum Bendungan 6
2.1.1 Definisi dan Fungsi Bendungan 6
2.1.2 Klasifikasi Bendungan Berdasarkan Struktur dan Material 6
2.1.3 Komponen Utama Bendungan 6
2.1.4 Kriteria Desain dan Stabilitas Bendungan 7
2.2 Stabilitas Lereng dan Tubuh Bendungan 8
2.2.1. Konsep Stabilitas Lereng 8

2.2.2. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Stabilitas Tubuh Bendungan.....8
2.2.3. Parameter Geoteknik Penting 9
2.2.4. Kegagalan Geoteknik Umum pada Bendungan.....9
2.3 Kelongsoran pada Bendungan.....10
2.3.1. Definisi dan Klasifikasi Jenis Kelongsoran 10
2.3.2. Mekanisme Terjadinya Kelongsoran pada Tubuh Bendungan 10
2.3.3. Faktor Penyebab Kelongsoran 11
2.3.4. Studi Empiris dan Kasus Kelongsoran 11
2.4 Analisis Stabilitas Lereng.....11
2.4.1. Stabilitas Lereng Galian dan Timbunan.....11
2.4.2. Jenis-jenis Lereng 12
2.4.3. Data yang Diperlukan dalam Perencanaan Lereng.....13
2.4.4. Kriteria Perancangan Lereng 14
2.4.5. Kriteria Faktor Keamanan 15
2.4.6. Analisis Lereng Tanah 16
2.4.7. Analisis Lereng Batuan.....17
2.4.8. Metode Irisan Dalam Analisis Stabilitas Lereng 19
2.4.9. Metode *Bishop* dalam Analisis Stabilitas Lereng 22
2.5 Pengaruh Kondisi Hidrogeologi dan Drainase 24
2.5.1. Peran Air Tanah dan Tekanan Pori terhadap Stabilitas Bendungan....24
2.5.2. Sistem Drainase dalam Tubuh Bendungan 25
2.5.3. Evaluasi Efektivitas Sistem Drainase dalam Mengurangi Potensi Kelongsoran.....25
2.6 Rembesan Air dalam Tanah.....26
2.6.1. Daya Rembesan *(Permeability)* 27
2.6.2. Rembesan Air di Lapangan.....28
2.6.3. Analisis Aliran Debris.....29
2.7 Peran Perangkat Lunak GeoStudio dalam Analisis Geoteknik 29
2.7.1. GeoStudio.....29
2.7.2. Studi Terdahulu Terkait Penggunaan *SLOPE*/W dan *SEEP*/W 30
2.8 Studi Terdahulu yang Relevan.....31
2.8.1. Tinjauan Studi Kelongsoran pada Bendungan Sejenis 33

2.8.2. Tinjauan Studi Kasus di Bendungan Ir. H. Djuanda 34
2.8.3. Identifikasi *Gap* Riset dan Relevansi terhadap Penelitian Saat Ini.....34
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 36
3.1 Desain Penelitian 36
3.2 Lokasi Penelitian 37
3.3 Teknik Sampling 42
3.4 Instrumen Penelitian 43
3.5 Alir Penelitian 44
3.6 TAHAP 1: Identifikasi Masalah 45
3.7 TAHAP 2: Pengumpulan dan Pengolahan Data 47
3.8 TAHAP 3: Analisis Data 49
3.9 TAHAP 4: Kesimpulan dan Saran 49
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 51
4.1. Gambaran Umum Kondisi Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur ...51
4.2. Kondisi Geometri dan Karakteristik Material Bendungan 51
4.2.1. Kondisi Geometrik Tubuh Bendungan 51
4.2.2. Karakteristik Tanah dan Parameter Geoteknik 52
4.3. Analisis Rembesan Menggunakan *SEEP*/W 53
4.4. Analisis Stabilitas Lereng Menggunakan *SLOPE*/W 61
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 72
5.1. Kesimpulan 72
5.2. Saran 73
DAFTAR PUSTAKA 75
LAMPIRAN 77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Pola Keruntuhan Dan Penetapan Kuat Batuan Dalam Analisis Stabilitas Lereng 19

Gambar 3. 2 Lokasi Longsor 37
Gambar 3. 4 Layout Longsoran Pasir Gombong.....39
Gambar 3. 5 Gambar Potongan 1 dan 2 40
Gambar 3. 6 Gambar Potongan 3 dan 4 41
Gambar 3. 7 Gambar Potongan 5 42
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian 45

Gambar 4. 1 Gambar Potongan Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur.54
Gambar 4. 2 Pembagian Zona Tanah 55
Gambar 4. 3 Parameter Hidraulik.....55
Gambar 4. 4 Pengaturan *Mesh* 56
Gambar 4. 5 Penetapan *Boundary Conditions*.....57
Gambar 4. 6 Hasil Pemodelan Analisis Rembesan menggunakan GeoStudio *SEEP/W*.....58
Gambar 4. 7 Pola Aliran Rembesan Pada Lereng Bendungan Pada Kondisi Hujan *(SEEP/W)* 60
Gambar 4. 8 Parameter Material Eksisting 63
Gambar 4. 9 Parameter *Silty Clay* dari Pengujian Laboratorium 64
Gambar 4. 10 Parameter *Hard Clay* dari Pengujian Laboratorium.....64
Gambar 4. 11 Parameter *Gravel* dari Pengujian Laboratorium 65
Gambar 4. 12 Kondisi Muka Air Tanah Normal 65
Gambar 4. 13 Muka Air Tanah Tinggi.....66
Gambar 4. 14 Pemodelan Kondisi Eksisting Sebelum Longsor 67
Gambar 4. 15 Pemodelan Kondisi Setelah Longsor Tanpa Dipengaruhi Tekanan Air Pori.....68
Gambar 4. 16 Pemodelan Kondisi Setelah Longsor yang Dipengaruhi Tekanan Air Pori Normal 68

Gambar 4. 17 Pemodelan Kondisi Setelah Longsor yang Dipengaruhi Tekanan Air Pori Tinggi 69

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Nilai *Factor Of Safety* Untuk Lereng Tanah 16
Tabel 2. 2 Rekomendasi Nilai *Factor Of Safety* Untuk Lereng Batuan.....16
Tabel 2. 3 *Gap* Penelitian.....34

Tabel 4. 1 Data Hasil Uji Laboratorium Tanah Eksisting.....52
Tabel 4. 2 Parameter Tanah Area Pasir Gombong 52
Tabel 4. 3 Hasil Analisis *Factor of Safety* (FS) Bendungan Pelana dalam berbagai kondisi.....70

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A. 1 Peta Lokasi Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur 77
Lampiran A. 2 Penampang Melintang Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur 78
Lampiran A. 3 Data Curah Hujan Pada Saat Kejadian Longsor 79
Lampiran A. 4 Kondisi Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur Pasca Longsor 80
Lampiran A. 5 Longsoran Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur Sisi *Upstream* 80
Lampiran A. 6 Pengambilan Sampel Tanah.....81
Lampiran A. 7 Pekerjaan Pengeboran Tanah *(Bor Log)* 82
Lampiran A. 8 Wawancana dan Pengumpulan Data Penelitian 84

Lampiran B. 1 Data Tanah Pasir Gombong.....85
Lampiran B. 2 Rekapitulasi Parameter Fisik Tanah.....86
Lampiran B. 3 Kadar Air.....87
Lampiran B. 4 Berat Jenis Tanah 88
Lampiran B. 5 *Atteberg Limit*.....89
Lampiran B. 6 Uji Kuat Geser Tanah.....90

Lampiran C. 1 Geometri Dan Pembagian Zona Material.....91
Lampiran C. 2 Penetapan Parameter Hidraulik Tanah 92
Lampiran C. 3 Pengaturan Kepadatan *Mesh* 93
Lampiran C. 4 Pola Aliran Rembesan *(Flow Net)* 94
Lampiran C. 5 Pola Aliran Rembesan Kondisi Hujan.....95

Lampiran D. 1 Parameter Kuat Geser Tanah (Eksisting) 96
Lampiran D. 2 Parameter Kuat Geser Tanah *Silty Clay*.....96
Lampiran D. 3 Parameter Kuat Geser Tanah *Hard Clay*.....97
Lampiran D. 4 Parameter Kuat Geser Tanah *Gravel*.....97
Lampiran D. 5 Hasil Analisis *Factor of Safety* (FS) Eksisting 98

Lampiran D. 6 Hasil Analisis *Factor of Safety* (FS) Setelah Longsor 99
Lampiran D. 7 Hasil Analisis *Factor of Safety* (FS) Muka Air Normal 100
Lampiran D. 8 Hasil Analisis *Factor of Safety* (FS) Muka Air Tinggi 101

Lampiran E. 1 Lembar Bimbingan Tugas Akhir.....102

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bendungan merupakan salah satu infrastruktur vital dalam pengelolaan sumber daya air di Indonesia, terutama untuk irigasi, penyediaan air baku, pengendalian banjir, dan pembangkit listrik tenaga air. Keberadaan bendungan tidak hanya mendukung aktivitas ekonomi dan sosial masyarakat, tetapi juga berfungsi sebagai penopang ketahanan air regional. Namun, dibalik perannya yang penting, bendungan urugan memiliki kerentanan terhadap gangguan stabilitas akibat karakteristik tanah dan dinamika air tanah yang terus berubah.

Permasalahan yang paling sering muncul pada bendungan urugan adalah kelongsoran lereng yang dipicu oleh rembesan, tekanan air pori, perubahan geometri, serta fluktuasi muka air Waduk. Kondisi ini dapat menyebabkan menurunnya faktor keamanan dan berdampak pada potensi kegagalan struktur jika tidak dianalisis secara tepat. Di Indonesia, sejumlah kasus rembesan dan ketidakstabilan lereng pada bendungan menunjukkan pentingnya evaluasi teknis yang akurat dan berkelanjutan.

Situasi tersebut menjadi semakin signifikan pada Bendungan Ir. H. Djuanda, yang membendung aliran Sungai Citarum di kawasan Jatiluhur, Kabupaten Purwakarta. Bendungan ini memiliki area genangan sekitar ± 83 km² dengan keliling waduk mencapai 150 km pada elevasi muka air normal +107 mdpl. Kondisi serupa juga tampak pada Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur, yang berfungsi strategis dalam mengendalikan aliran air serta menahan potensi rembesan pada area pelana. Pada hari Minggu, 24 Februari 2021, ketika intensitas hujan tercatat mencapai 97 mm, terjadi fenomena longsor pada lereng hulu yang berjarak sekitar 12 meter dari tepi puncak bendungan. Longsoran tersebut memiliki kedalaman antara 2,4 hingga 4 meter, dengan lebar sekitar 35 meter dan panjang 40 meter, serta mempengaruhi area sepanjang 52 meter dari puncak longsoran. Indikasi kerusakan ini menunjukkan adanya pergerakan tanah di area hulu *(upstream)*. Kejadian longsor pada *Upstream* Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur tersebut

menimbulkan kekhawatiran terhadap keamanan tanggul pelana serta aset dan infrastruktur lain yang berada di sekitarnya. Oleh karena itu, peneliti memandang perlu dilakukannya analisis stabilitas yang lebih komprehensif.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan untuk mengevaluasi stabilitas Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur melalui analisis rembesan dan perhitungan faktor keamanan menggunakan perangkat lunak *GeoStudio* (SLOPE/W dan SEEP/W). Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh gambaran yang lebih jelas mengenai mekanisme kelongsoran serta kondisi kritis yang dapat memengaruhi keselamatan bendungan.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, dapat dikenali bahwa bendungan urugan memiliki potensi ketidakstabilan lereng yang cukup tinggi karena sifat tanah dan kondisi air tanah yang selalu berubah seiring waktu. Situasi ini memperbesar kemungkinan terjadinya kelongsoran, terutama ketika rembesan, tekanan air pori, perubahan muka air waduk, dan modifikasi geometri tubuh bendungan terjadi secara bersamaan. Permasalahan tersebut terlihat jelas pada Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur setelah insiden longsor pada 24 Februari 2021, yang mengindikasikan adanya pergerakan massa tanah serta gejala ketidakstabilan pada lereng hulu. Peristiwa ini menimbulkan kekhawatiran akan menurunnya faktor keamanan dan potensi gangguan terhadap keselamatan bendungan apabila tidak dilakukan analisis teknis yang memadai. Selain itu, belum tersedianya kajian komprehensif mengenai pola rembesan dan kondisi tekanan air pori, serta ketiadaan rekomendasi teknis yang jelas, menunjukkan perlunya penelitian lanjutan untuk menilai stabilitas bendungan secara lebih menyeluruh melalui analisis numerik menggunakan perangkat lunak *SEEP*/W dan *SLOPE*/W.

1.3 Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik geoteknik dan geometri tubuh Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur yang berpotensi memengaruhi kestabilan lereng?
2. Bagaimana pengaruh tekanan air pori dan pola rembesan terhadap tingkat kestabilan lereng pada berbagai kondisi muka air waduk?

3. Apakah nilai *factor of safety* (FS) lereng yang diperoleh dari hasil analisis telah memenuhi standar ambang batas keamanan bendungan yang berlaku secara nasional?
4. Rekomendasi teknis apa yang paling efektif dan aplikatif untuk mitigasi risiko kelongsoran serta peningkatan keselamatan Bendungan Pelana berdasarkan hasil analisis geoteknik dan hidraulik?

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi faktor-faktor utama yang menyebabkan kelongsoran pada Bendungan Pelana di Pasirgombong Timur, dengan pendekatan yang menggabungkan data lapangan dan metode analisa numerik berbasis perangkat lunak. Hasil penelitian diharapkan dapat memperjelas mekanisme kelongsoran dan memberikan masukan teknis yang dapat digunakan dalam upaya mitigasi risiko ke depan.

1. Menggali karakteristik geoteknik dan geometri tubuh Bendungan Pelana yang berpotensi memengaruhi kestabilan lereng.
2. Menelusuri pengaruh tekanan air pori dan pola rembesan terhadap kestabilan lereng dalam berbagai kondisi muka air waduk.
3. Membandingkan hasil analisis *factor of safety* (FS) lereng dengan standar ambang batas yang ditetapkan secara nasional.
4. Menyusun rekomendasi teknis yang aplikatif untuk mitigasi risiko kelongsoran dan peningkatan keselamatan Bendungan Pelana.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Kontribusi terhadap literatur geoteknik bendungan;
2. Pendalaman pemahaman terhadap mekanisme kelongsoran;
3. Penerapan analisis numerik dalam konteks local;
4. Evaluasi terhadap standar nasional;
5. Mitigasi risiko kelongsoran secara nyata dan terarah;
6. Peningkatan kualitas sistem pemantauan geoteknik;
7. Mendukung pengambilan keputusan berbasis data teknis;
8. Mendorong efisiensi dalam pengelolaan bendungan.

1.6 Batasan Masalah

Penelitian ini tidak membahas aspek sosial-ekonomi, manajemen operasional, atau kerusakan bangunan pelengkap. Fokus hanya pada analisis teknis stabilitas lereng bendungan pelana melalui simulasi numerik, baik dalam kondisi statis maupun dinamis.

1.6.1 Ruang Lingkup Lokasi

Penelitian ini berfokus pada Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur, bagian dari sistem Bendungan Ir. H. Djuanda yang dikelola oleh Perum Jasa Tirta II. Kajian dibatasi hanya pada tubuh bendungan, khususnya lereng hulu dan hilir, tanpa mencakup bangunan pelengkap seperti *spillway*, *intake*, atau *outlet*.

1.6.2 Populasi dan Sampel Data

Populasi meliputi seluruh data teknis terkait tubuh bendungan, seperti hasil uji tanah (SPT, kohesi, sudut geser), data *bor log*, dan muka air waduk. Sampel difokuskan pada penampang paling kritis berdasarkan observasi visual dan data instrumen.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada Tugas Akhir ini disusun sebagai berikut:

- BAB I — PENDAHULUAN

  Bab ini berfungsi sebagai fondasi awal dari penelitian, yang memaparkan konteks ilmiah sekaligus alasan mendasar mengapa topik ini penting untuk dikaji. Sub bab yang disusun dalam bagian ini antara lain:

  Latar belakang masalah**,** identifikasi masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

- BAB II — TINJAUAN PUSTAKA

  Bab ini menyusun dasar konseptual dan kerangka literatur yang relevan, sebagai pijakan dalam merumuskan pendekatan analisis. Pembahasan pada Bab ini meliputi konsep utama, kajian teoritis, kerangka berpikir dan penelitian terdahulu yang relevan dengan Tugas Akhir ini untuk kemudian dijadikan dasar argumen mengapa studi ini perlu dilakukan.

- BAB III — METODE PENELITIAN

  Bab ini menjelaskan mengenai lokasi penelitian, pendekatan ilmiah yang digunakan untuk menjawab rumusan masalah secara terukur dan sistematis.

Populasi mencakup seluruh struktur tubuh Bendungan Pelana, sementara sampel fokus pada penampang kritis yang dinilai memiliki risiko longsor tertinggi berdasarkan data geoteknik. Data yang digunakan terdiri dari data primer (hasil uji tanah, pengukuran muka air dan tekanan pori) serta data sekunder (dokumen desain, dan laporan teknis dari Perum Jasa Tirta II). Analisis dilakukan dengan menghitung *factor of safety* (FS) lereng dalam berbagai kondisi pembebanan, seperti kondisi normal. Hasil dianalisis dengan mengacu pada standar keamanan bendungan yang berlaku.

- BAB IV — HASIL DAN PEMBAHASAN

  Bab ini menyajikan hasil temuan penelitian secara sistematis, dan membahasnya secara kritis berdasarkan pertanyaan penelitian. Menyajikan data teknis dan geologis Bendungan Pelana, termasuk visualisasi berupa gambar penampang bendungan dan karakteristik tanah setempat. Menampilkan hasil simulasi dalam bentuk tabel dan grafik yang menunjukkan nilai *factor of safety* (FS) pada tiap skenario pembebanan. Menganalisis bagaimana rembesan, tekanan air pori, fluktuasi muka air, serta beban gempa memengaruhi kestabilan lereng bendungan. Hasil yang diperoleh akan dikaji lebih lanjut dengan membandingkannya dengan studi sebelumnya seperti oleh Ekasari (2022), Huda (2019), dan Zain (2023), serta melihat kesesuaian atau perbedaannya terhadap teori yang digunakan.
- BAB V — KESIMPULAN DAN SARAN

  Bab terakhir ini menyimpulkan temuan utama, menyampaikan implikasi, serta memberikan saran untuk tindakan lanjutan. Merangkum hasil penelitian secara ringkas, dengan menjawab poin-poin dari rumusan masalah secara langsung dan terfokus. Pada aspek teoretis, penelitian ini memperkuat penerapan analisis numerik dalam studi bendungan urugan. Sementara secara praktis, hasil studi ini memberikan rekomendasi teknis yang bisa diterapkan oleh pihak pengelola bendungan untuk mengurangi risiko kelongsoran.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Umum Bendungan

2.1.1 Definisi dan Fungsi Bendungan

Dalam literatur klasik *Open-Channel Hydraulics*, Chow (1959) mendefinisikan bendungan sebagai suatu struktur rekayasa sipil yang dirancang untuk menahan aliran air serta mengontrol debit sungai. Fungsi utamanya meliputi penyediaan air untuk irigasi, pengendalian banjir, suplai air baku, serta pembangkitan tenaga listrik. Secara operasional, karakteristik utama bendungan dapat diukur melalui kapasitas pelimpah (dalam satuan m^3/detik), volume tampungan total, serta jenis penggunaannya baik untuk irigasi, pembangkit listrik tenaga air (PLTA), pengendalian banjir, atau kombinasi ketiganya.

2.1.2 Klasifikasi Bendungan Berdasarkan Struktur dan Material

Berdasarkan penjelasan Das dan Sobhan (2010) dalam *Principles of Geotechnical Engineering*, bendungan dapat dikelompokkan menurut jenis material penyusunnya. Secara umum, terdapat dua kategori utama, yakni bendungan beton dan bendungan urugan. Bendungan beton mencakup tipe gravitasi, lengkung, dan bertulang, sementara bendungan urugan meliputi *earthfill* atau *rockfill* dengan inti kedap air sebagai elemen penting. Dari sisi variabel teknik, klasifikasi ini berkaitan erat dengan jenis material yang digunakan (kategorikal: 1 = beton, 2 = urugan) dan tipe struktur (gravitasi atau urugan), yang akan berpengaruh terhadap desain dan analisis stabilitasnya.

2.1.3 Komponen Utama Bendungan

Merujuk pada Bowles (1997) dalam *Foundation Analysis and Design*, setiap bendungan terdiri dari beberapa komponen utama yang memiliki fungsi spesifik. Komponen tersebut antara lain: (1) inti kedap air biasanya berupa tanah liat atau aspal yang berperan sebagai zona impermeabel untuk menghambat rembesan; (2) tubuh bendung, yaitu bagian utama yang menahan massa air; (3) pelimpah (*spillway*) sebagai saluran pelepas air saat banjir; dan (4) sistem drainase internal yang berfungsi mengendalikan tekanan pori. Variabel-variabel

seperti koefisien permeabilitas (k), tekanan pori (u), dan efektivitas sistem drainase (misalnya dalam persentase rembesan) menjadi indikator teknis yang dapat digunakan untuk menilai kinerja struktur bendungan secara keseluruhan.

2.1.4 Kriteria Desain dan Stabilitas Bendungan

A. Regulasi dan Standar

Dalam standar nasional seperti SNI 8062:2015 tentang Tata Cara Desain Tubuh Bendungan Tipe Urugan, SNI 8065:2015 tentang Metode Analisis dan Cara Pengendalian Rembesan Air untuk Bendungan Tipe Urugan, dan SNI 1724:2015 tentang Analisis Hidorlogi, Hidraulik, dan Kriteria Desain Bangunan Sungai, ditetapkan bahwa nilai minimum *factor of safety* (FS) untuk kondisi beban statik adalah 1,2, sementara untuk kestabilan terhadap rembesan diperlukan nilai FS minimal sebesar 4. Selain itu, dalam perencanaan pelimpah, debit banjir dirancang berdasarkan periode ulang antara 100 hingga 1000 tahun, sesuai klasifikasi risiko dan fungsi bendungan. Variabel-variabel yang relevan dalam konteks ini mencakup nilai *factor of safety* (FS), jenis beban (statik, hidrolik, maupun seismik), serta debit banjir rencana.

B. Teori Geoteknik Klasik

Dalam ilmu mekanika tanah, sejumlah teori klasik menjadi dasar dalam perancangan dan analisis stabilitas bendungan. Prinsip Tegangan Efektif yang dikembangkan oleh Terzaghi (1925) menyatakan bahwa tegangan efektif (σ') merupakan selisih antara tegangan total (σ) dan tekanan air pori (u), atau dituliskan sebagai $\sigma' = \sigma - u$. Sementara itu, kriteria *Mohr–Coulomb* memberikan formulasi untuk kekuatan geser tanah melalui persamaan $\tau = c' + \sigma' \tan \varphi'$, yang melibatkan kohesi efektif (c'), tegangan efektif (σ'), dan sudut geser dalam (φ'). Selain itu, teori tekanan tanah lateral oleh Rankine turut digunakan dalam menentukan tekanan aktif dan pasif yang bekerja pada bagian inti dan tubuh bendungan.

C. Stabilitas Lereng

Analisis stabilitas lereng merupakan aspek krusial dalam perencanaan bendungan. Menurut Das dan Sobhan (2010), nilai FS diperoleh dari rasio antara jumlah gaya penahan terhadap jumlah gaya penggeser. Berbagai

metode keseimbangan batas seperti *Bishop Simplified, Janbu*, dan *Spencer* biasa digunakan untuk analisis ini, baik melalui pendekatan manual maupun dengan bantuan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga *(finite element method)* dan metode keseimbangan batas *(limit equilibrium method)*. Dalam hal ini, variabel penting yang dianalisis mencakup parameter kekuatan tanah seperti kohesi (c′), sudut geser dalam (φ′), berat isi basah (γ′), geometri lereng (tinggi dan kemiringan), serta nilai *factor of safety* (FS) yang dihasilkan dari perhitungan.

2.2 Stabilitas Lereng dan Tubuh Bendungan

2.2.1. Konsep Stabilitas Lereng

Stabilitas lereng dapat dipahami sebagai kondisi ketika gaya-gaya penahan yang bekerja pada suatu kemiringan, seperti tubuh bendungan, mampu menahan gaya-gaya yang mendorong massa tanah untuk bergeser. Gaya penggerak biasanya berasal dari berat tanah, tekanan air pori, serta pengaruh air permukaan, sedangkan gaya penahan berasal dari kohesi tanah, gesekan dalam, dan konfigurasi geometri lereng itu sendiri. Menurut Duncan dan Wright (1980), kestabilan lereng dinyatakan melalui nilai *factor of safety* (FS), yaitu rasio antara total gaya penahan terhadap total gaya penggerak:

$$FS = \frac{\sum gaya\ penahan}{\sum gaya\ penggerak} \qquad 2.1$$

Apabila nilai *factor of safety* (FS) lebih besar dari 1, lereng dinyatakan stabil; namun jika *factor of safety* (FS) kurang dari atau sama dengan 1, maka kondisi tersebut mengindikasikan potensi keruntuhan. Perhitungan nilai FS dapat dilakukan menggunakan metode *limit equilibrium method* (LEM) maupun *finite element method* (FEM). Dalam konteks ini, gaya penahan biasanya terdiri atas kohesi efektif (c′), komponen geser akibat sudut geser dalam (φ′), dan berat tanah itu sendiri. Sementara gaya penggerak umumnya dipengaruhi oleh berat tanah, tekanan air pori (u), dan tekanan hidrostatik.

2.2.2. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Stabilitas Tubuh Bendungan

Menurut Fell et al. (2015) dalam *Geotechnical Engineering of Dams*, terdapat sejumlah faktor penting yang berkontribusi terhadap kestabilan lereng pada bendungan, terutama yang bersifat urugan. Pertama adalah karakteristik

material seperti kohesi (c′), sudut geser dalam (φ′), dan berat volume tanah jenuh (γ′). Tekanan air pori (u), yang dipengaruhi oleh sistem drainase dan kondisi hidrologi, juga memiliki peranan besar dalam menurunkan tegangan efektif. Geometri tubuh bendungan, seperti ketinggian dan kemiringan lereng, akan menentukan besar kecilnya gaya penggerak yang bekerja. Selain itu, sifat permeabilitas tanah (k) dan efisiensi sistem drainase sangat berpengaruh terhadap distribusi tekanan air di dalam tubuh bendungan. Di sisi lain, beban luar seperti gaya seismik, tekanan air akibat banjir desain, dan fluktuasi muka air juga harus diperhitungkan dalam analisis stabilitas. Variabel-variabel ini umumnya diperoleh dari data hasil pengujian laboratorium (misalnya *triaxial test* dan *direct shear*), survei geometri di lapangan, dan pemodelan aliran hidrolik.

2.2.3. Parameter Geoteknik Penting

Dalam buku *Craig's Soil Mechanics* (Craig, 2004), sejumlah parameter dasar geoteknik dijelaskan sebagai elemen kunci dalam analisis stabilitas tanah. Kohesi efektif (c′) menggambarkan kemampuan partikel tanah untuk saling mengikat, terutama pada tanah lempung. Sudut geser dalam (φ′) menunjukkan resistensi internal tanah terhadap gaya geser, dan merupakan fungsi dari jenis mineral, kepadatan, dan struktur tanah. Berat volume efektif (γ′) digunakan untuk menghitung tekanan vertikal pada tanah dalam kondisi jenuh air. Sementara itu, permeabilitas (k) menunjukkan kemampuan tanah dalam mengalirkan air, dan sangat berkaitan dengan tekanan air pori (u) yang terbentuk. Semua parameter ini biasanya diukur dalam satuan teknis seperti c′ (kPa), φ′ (derajat), γ′ (kN/m³), k (m/s), dan u (kPa), dan memiliki peran langsung dalam menentukan kestabilan tubuh bendungan.

2.2.4. Kegagalan Geoteknik Umum pada Bendungan

Beberapa jenis kegagalan geoteknik sering terjadi pada bendungan, seperti dijelaskan oleh Duncan et al. (1990) dan Ohio EPA (2005). Kegagalan paling umum adalah kelongsoran**,** yaitu ketika massa tanah bergeser secara signifikan akibat nilai FS ≤ 1. Selain itu, terdapat fenomena *piping* atau erosi internal, yaitu proses pergerakan partikel halus dalam tubuh bendungan akibat rembesan air yang tidak terkendali, yang lama-kelamaan membentuk rongga hingga

menyebabkan retakan dan potensi keruntuhan total. Kegagalan lainnya adalah penurunan (*settlement*)**,** yang dapat terjadi secara diferensial dan menghasilkan deformasi vertikal tidak seragam, sehingga meningkatkan kerentanan terhadap rembesan dan retakan. Masing-masing bentuk kegagalan ini dapat dikenali melalui indikator teknis seperti volume massa tanah yang bergeser (m^3), besar penurunan (dalam mm), serta debit rembesan (dalam l/s atau m^3/hari) yang keluar dari tubuh bendungan.

2.3 Kelongsoran pada Bendungan

2.3.1. Definisi dan Klasifikasi Jenis Kelongsoran

Kelongsoran pada tubuh bendungan merujuk pada perpindahan massa tanah atau material struktur yang terjadi ketika gaya penahan tidak lagi mampu mengimbangi gaya penggerak seperti gravitasi atau tekanan air pori. Peristiwa ini sering disebabkan oleh penurunan kekuatan geser tanah hingga di bawah ambang aman. Dalam kajian geomorfologi oleh Costa dan Schuster (1988), jenis kelongsoran diklasifikasikan menjadi lima tipe utama berdasarkan bentuk morfologi dan kondisi medan, serta tiga sub-tipe menurut karakteristik material penyusunnya, seperti batu besar, material lepas, atau susunan berlapis. Klasifikasi ini penting untuk memahami mekanisme kegagalan secara lebih komprehensif serta dalam menentukan strategi mitigasi yang tepat.

2.3.2. Mekanisme Terjadinya Kelongsoran pada Tubuh Bendungan

Menurut studi oleh Okeke dan Wang (2016), ada dua mekanisme dominan yang menyebabkan kelongsoran akibat rembesan, yaitu: (1) inisiasi erosi internal (*seepage erosion*) dan (2) keruntuhan bagian atas bendungan (*collapse of dam crest*), yang biasanya dipicu oleh tercapainya gradien hidraulik kritis di kisaran 0,042 hingga 0,147. Penelitian eksperimental seperti yang dilakukan Gregoretti dkk. menggunakan model flume menunjukkan bahwa variabel seperti diameter partikel (d50), koefisien infiltrasi (k), laju rembesan (qin), kerapatan partikel (ρs), serta sudut lereng (θ) sangat menentukan jenis kegagalan yang terjadi, apakah melalui limpasan air (*overtopping*) atau keruntuhan lereng (*slope failure*).

2.3.3. Faktor Penyebab Kelongsoran

Beragam faktor *internal* dan *external* dapat memicu kelongsoran pada bendungan. Dari sisi geologi, jenis litologi, tingkat pelapukan, serta struktur rekahan tanah atau batuan seperti *joints* mempengaruhi kekuatan tanah. Dari aspek hidrologi, intensitas hujan tinggi atau fluktuasi muka air secara mendadak dapat meningkatkan tekanan air pori dan menyebabkan ketidakstabilan. Aktivitas seismik juga berkontribusi melalui guncangan yang menambah tekanan dan mengubah struktur tanah. Kesalahan dalam tahap konstruksi, seperti peletakan inti kedap air yang tidak tepat atau sistem drainase yang tidak memadai, dapat mempercepat terjadinya *piping* dan kelongsoran. Selain itu, faktor geomorfologi seperti topografi dan sudut kemiringan lereng sangat berpengaruh terhadap besarnya gaya penggerak.

2.3.4. Studi Empiris dan Kasus Kelongsoran

Sejumlah kasus nyata menunjukkan bagaimana berbagai faktor tersebut bekerja secara simultan menyebabkan kegagalan bendungan. Pada kasus *Fujinuma Dam* di Jepang, gempa Tohoku 2011 menyebabkan kerusakan sistem drainase dan munculnya rembesan pada inti bendungan urugan. Sementara itu, *Teton Dam* di Amerika Serikat mengalami keruntuhan akibat retaknya inti *loess* dan adanya fraktur pada batuan dasar yang memicu fenomena *piping* internal. Secara global, analisis statistik menunjukkan bahwa lebih dari sepertiga kegagalan bendungan disebabkan oleh limpasan air permukaan (*overtopping*), dan sekitar 28% oleh *piping*. Penelitian eksperimental menggunakan *flume* juga berhasil menunjukkan relasi matematis antara rasio ukuran butir terhadap tinggi bendungan (d50/H), laju rembesan (qin/H^2.5), serta fungsi trigonometri sudut lereng (sin(θ + βd)) dengan jenis kegagalan yang muncul.

2.4 Analisis Stabilitas Lereng

2.4.1. Stabilitas Lereng Galian dan Timbunan

Stabilitas lereng, baik pada konstruksi galian maupun timbunan, sangat ditentukan oleh keseimbangan antara dua kelompok gaya yang saling berlawanan. Di satu sisi terdapat gaya penahan yang mencakup kohesi tanah, sudut geser dalam, serta berat tanah itu sendiri. Di sisi lain terdapat gaya

pendorong yang berasal dari faktor eksternal seperti beban tambahan di permukaan, tekanan air pori yang meningkat, hingga pengaruh gaya seismik. Interaksi antara kedua gaya ini akan menentukan apakah suatu lereng berada dalam kondisi stabil atau justru berpotensi mengalami kelongsoran.

Menurut Terzaghi & Peck (1967), kondisi stabilitas lereng timbunan memiliki karakteristik khusus yang membuatnya lebih rentan terhadap kegagalan. Kerentanan ini umumnya disebabkan oleh ketidakseragaman material penyusun timbunan dan proses konsolidasi tanah yang belum selesai, sehingga kekuatan tanah belum tercapai secara optimal. Sebaliknya, pada lereng hasil galian, masalah utama terletak pada hilangnya tegangan alami tanah akibat proses penggalian. Pelepasan tegangan ini mengurangi kekuatan geser tanah, sehingga memperbesar kemungkinan terjadinya kelongsoran.

Dalam penelitian ini, terdapat tiga parameter utama yang dijadikan variabel untuk menganalisis stabilitas lereng, yaitu kohesi (c), sudut geser dalam (φ), dan berat volume tanah (γ). Ketiga parameter tersebut memiliki peran penting dalam menentukan besarnya nilai *factor of safety* (FS) lereng. Faktor keamanan inilah yang kemudian digunakan sebagai indikator utama untuk menilai sejauh mana suatu lereng mampu bertahan terhadap gaya pendorong yang bekerja, sehingga dapat dijadikan acuan dalam merancang langkah-langkah pencegahan maupun penanganan risiko kelongsoran.

2.4.2. Jenis-jenis Lereng

Secara umum, lereng dapat dikelompokkan menjadi dua jenis utama, yaitu lereng alami dan lereng buatan. Lereng alami terbentuk melalui proses geologi yang berlangsung secara alami selama kurun waktu tertentu, seperti aktivitas tektonik, erosi, dan sedimentasi. Sementara itu, lereng buatan merupakan hasil dari aktivitas manusia yang sengaja dibentuk untuk tujuan tertentu, misalnya pada konstruksi timbunan bendungan, tanggul, atau infrastruktur lainnya (Hardiyatmo, 2012). Perbedaan asal-usul pembentukan ini membuat kedua jenis lereng memiliki karakteristik mekanika tanah yang berbeda, sehingga pendekatan analisisnya pun tidak dapat disamakan.

Dalam konteks perencanaan dan pembangunan bendungan, perhatian khusus harus diberikan pada stabilitas lereng buatan. Lereng jenis ini sangat

dipengaruhi oleh kondisi teknis dan lingkungan sekitar, seperti tingkat kejenuhan tanah akibat air, fluktuasi muka air yang naik-turun secara periodik, serta pengaruh beban gempa. Faktor-faktor tersebut dapat menurunkan kekuatan geser tanah dan meningkatkan risiko kelongsoran jika tidak diperhitungkan secara tepat. Oleh karena itu, analisis stabilitas lereng buatan memerlukan parameter yang lebih kompleks dibandingkan lereng alami.

Selain itu, variabel jenis lereng (alami atau buatan) juga berfungsi sebagai dasar klasifikasi dalam kajian geoteknik. Kategori ini menjadi penting karena karakteristik setiap jenis lereng akan memengaruhi metode analisis yang digunakan, termasuk pemodelan numerik maupun pendekatan empiris. Dengan memahami perbedaan sifat dan risiko pada masing-masing jenis lereng, perencana dapat merancang strategi desain yang lebih akurat dan efektif dalam menjaga keamanan serta keandalan struktur bendungan maupun tanggul.

2.4.3. Data yang Diperlukan dalam Perencanaan Lereng

Menurut SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik, terdapat sejumlah data penting yang wajib dikumpulkan untuk melakukan analisis stabilitas lereng secara komprehensif. Data pertama berkaitan dengan aspek geometri lereng, meliputi tinggi lereng (H), besar sudut kemiringan lereng (β), serta parameter geoteknik lain yang menggambarkan dimensi dan bentuk fisik lereng. Informasi geometri ini sangat menentukan kondisi awal lereng, karena perbedaan tinggi dan sudut kemiringan akan berpengaruh langsung terhadap besarnya gaya pendorong dan gaya penahan yang bekerja.

Selain aspek geometrik, data sifat tanah juga menjadi komponen utama yang perlu diperhatikan. Parameter ini mencakup nilai kohesi, sudut geser dalam, berat volume tanah, hingga tingkat permeabilitas. Setiap karakteristik tersebut berkontribusi terhadap perilaku mekanis tanah, misalnya dalam menentukan kekuatan geser, kemampuan menahan beban, serta potensi terjadinya rembesan air. Oleh karena itu, pengukuran sifat tanah secara akurat menjadi prasyarat penting dalam memastikan validitas hasil analisis.

Data berikutnya yang tidak kalah penting adalah informasi hidrogeologi, meliputi posisi muka air tanah, distribusi tekanan air pori, dan debit rembesan yang mungkin terjadi di dalam tubuh lereng. Faktor-faktor hidrogeologi ini

sering kali menjadi penyebab utama penurunan stabilitas, karena keberadaan air dapat mengurangi kekuatan geser tanah sekaligus menambah gaya pendorong. Dengan demikian, pemahaman yang baik mengenai kondisi air tanah sangat diperlukan untuk mencegah terjadinya kelongsoran.

Selain itu, data mengenai beban luar juga harus diperhitungkan dalam analisis. Beban ini meliputi pengaruh gaya seismik akibat gempa bumi, beban tambahan dari konstruksi yang berada di atas lereng, serta dampak hidrodinamis dari pergerakan air. Seluruh beban eksternal ini berpotensi memperbesar risiko kegagalan lereng apabila tidak dimasukkan ke dalam perhitungan.

Secara keseluruhan, keempat kelompok data tersebut berfungsi sebagai variabel bebas dalam perhitungan stabilitas lereng. Variabel-variabel inilah yang akan memengaruhi variabel terikat utama, yaitu *factor of safety* (FS). Dengan demikian, semakin lengkap dan akurat data yang dikumpulkan, semakin dapat diandalkan pula hasil analisis dalam menentukan tingkat stabilitas lereng yang diteliti.

2.4.4. Kriteria Perancangan Lereng

Berdasarkan SNI 8460:2017 tentang tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik, kelayakan stabilitas suatu lereng dinilai melalui besarnya *factor of safety* (FS). Pada kondisi beban statis normal, suatu lereng dikategorikan aman apabila memiliki nilai *factor of safety* (FS) ≥ 1,5. Artinya, gaya penahan yang bekerja jauh lebih besar dibandingkan gaya pendorong, sehingga potensi terjadinya kelongsoran sangat kecil. Namun, pada kondisi gempa, ambang batas keamanan berbeda. Lereng masih dapat dianggap stabil jika nilai *factor of safety* (FS) berada pada kisaran 1,1 hingga 1,2, karena adanya tambahan gaya seismik yang memang menurunkan kapasitas stabilitas tanah.

Dalam penelitian ini, *factor of safety* (FS) diperlakukan sebagai variabel dependen yang menjadi fokus utama analisis. Nilai *factor of safety* (FS) mencerminkan hasil akhir dari interaksi berbagai parameter yang memengaruhi stabilitas lereng. Oleh karena itu, perubahan nilai *factor of safety* (FS) akan menunjukkan sejauh mana kondisi geoteknik, geometri, maupun hidrologi suatu lereng berkontribusi terhadap potensi kelongsoran.

Sementara itu, variabel independen dalam penelitian ini mencakup sejumlah parameter yang terbagi ke dalam tiga kelompok utama, yakni parameter geoteknik (kohesi, sudut geser dalam, berat volume tanah), parameter geometri (tinggi dan sudut lereng), serta parameter hidrologi (muka air tanah dan tekanan air pori). Ketiga kelompok variabel ini secara bersama-sama menentukan kondisi stabilitas, sehingga analisis keterkaitannya menjadi penting untuk memahami mekanisme kelongsoran.

Hubungan antar variabel kemudian dianalisis secara kuantitatif untuk mengidentifikasi faktor dominan yang paling berpengaruh terhadap nilai *factor of safety* (FS). Dengan cara ini, penelitian tidak hanya menilai apakah lereng berada dalam kondisi aman atau tidak, tetapi juga mengungkap parameter kritis yang perlu dikendalikan agar risiko kelongsoran dapat diminimalkan. Temuan ini diharapkan memberikan kontribusi praktis dalam perencanaan desain dan strategi pengendalian stabilitas lereng, khususnya pada konstruksi bendungan.

2.4.5. Kriteria Faktor Keamanan

Faktor keamanan yang dipersyaratkan dalam analisis kestabilan lereng tanah ditunjukkan pada **Tabel 2.1**, yang ditetapkan dengan mempertimbangkan aspek biaya serta konsekuensi yang mungkin timbul akibat kegagalan lereng. Pertimbangan ini juga mencakup tingkat ketidakpastian dalam kondisi analisis yang digunakan. Dengan demikian, nilai *factor of safety* (FS) tidak hanya menjadi tolak ukur teknis, tetapi juga bagian dari upaya untuk menyeimbangkan antara risiko, efisiensi biaya, dan tingkat keandalan desain.

Sementara itu, untuk lereng batuan, ketentuan mengenai faktor keamanan dapat dilihat pada **Tabel 2.2**, di mana penetapannya didasarkan pada kondisi permanen maupun sementara dari lereng yang direncanakan. Hal ini penting karena karakteristik lereng batuan berbeda dengan lereng tanah, terutama terkait dengan struktur geologi dan kondisi mekanika massa batuan. Oleh sebab itu, analisis kestabilan lereng batuan membutuhkan kriteria faktor keamanan yang lebih spesifik dan disesuaikan dengan tujuan serta umur rancangan.

Selain itu, pengaruh air merupakan faktor penting yang harus diperhitungkan pada analisis lereng batuan. Apabila muka air tanah berada pada posisi tinggi, maka tekanan air pori dapat menurunkan nilai faktor keamanan

lereng. Untuk mengatasi hal tersebut, sering kali dilakukan usaha penurunan muka air tanah di dalam massa batuan. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah pemasangan bor horizontal yang berfungsi sebagai sistem drainase, sehingga air dapat dialirkan keluar dari massa batuan. Dengan cara ini, kestabilan lereng dapat ditingkatkan secara signifikan.

Tabel 2.2 pada akhirnya memberikan rekomendasi mengenai nilai faktor keamanan yang ideal untuk lereng batuan. Rekomendasi tersebut dapat menjadi acuan teknis dalam proses perencanaan maupun evaluasi, sehingga setiap desain lereng batuan dapat memenuhi standar keamanan yang telah ditetapkan.

Tabel 2. 1 Nilai *Factor Of Safety* Untuk Lereng Tanah

Biaya dan konsekuensi dari kegagalan lereng	Tingkat ketidakpastian kondisi analisis	
	Rendah[a]	Tinggi[b]
Biaya perbaikan sebanding dengan biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif	1,25	1,5
Biaya perbaikan lebih besar dari biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif	1,5	2,0 atau lebih

[a]Tingkat ketidakpastian kondisi analisis dikategorikan rendah, jika kondisi geologi dapat dipahami, kondisi tanah seragam, penyelidikan tanah konsisten, lengkap dan logis terhadap kondisi di lapangan.

[b]Tingkat ketidakpastian kondisi analisis dikategorikan tinggi, jika kondisi geologi sangat kompleks, kondisi tanah bervariasi, dan penyelidikan tanah tidak konsisten dan tidak dapat diandalkan.

Tabel 2. 2 Rekomendasi Nilai *Factor Of Safety* Untuk Lereng Batuan

Kondisi lereng batuan	**Rekomendasi nilai *factor of safety* (FS)**
Kondisi permanen	1,5
Kondisi sementara	1,3

2.4.6. Analisis Lereng Tanah

Analisis stabilitas lereng tanah pada umumnya dilakukan dengan pendekatan Metode Keseimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method*/LEM).

Beberapa teknik yang sering digunakan antara lain metode *Bishop Simplified*, metode *Janbu*, serta metode *Morgenstern-Price* (Das, 2011). Ketiga metode ini memiliki prinsip yang sama, yaitu mengevaluasi kondisi keseimbangan antara gaya penahan dan gaya pendorong pada suatu potongan lereng, sehingga diperoleh nilai *factor of safety* (FS) yang menjadi indikator utama tingkat stabilitas lereng.

Dalam penerapannya, LEM menggunakan persamaan keseimbangan momen dan gaya untuk melakukan perhitungan. Nilai *factor of safety* (FS) diperoleh dengan mengintegrasikan berbagai parameter geoteknik ke dalam model matematis yang merepresentasikan kondisi lereng. Parameter tersebut meliputi nilai kohesi tanah, sudut geser dalam, tekanan air pori, serta sudut kemiringan lereng. Setiap faktor memiliki pengaruh yang berbeda terhadap stabilitas, sehingga kombinasi nilainya akan menentukan apakah lereng berada dalam kondisi aman atau berpotensi longsor.

Konteks penelitian ini menjadikan metode tersebut sangat relevan, karena tidak hanya memberikan hasil berupa angka faktor keamanan, tetapi juga memungkinkan analisis mendalami mengenai kontribusi relatif dari setiap variabel. Dengan cara ini, peneliti dapat mengidentifikasi parameter yang paling dominan dalam memengaruhi terjadinya kelongsoran. Informasi tersebut penting untuk menyusun rekomendasi teknis, baik dalam perencanaan maupun upaya mitigasi, agar stabilitas lereng pada konstruksi seperti bendungan dapat terjaga secara optimal.

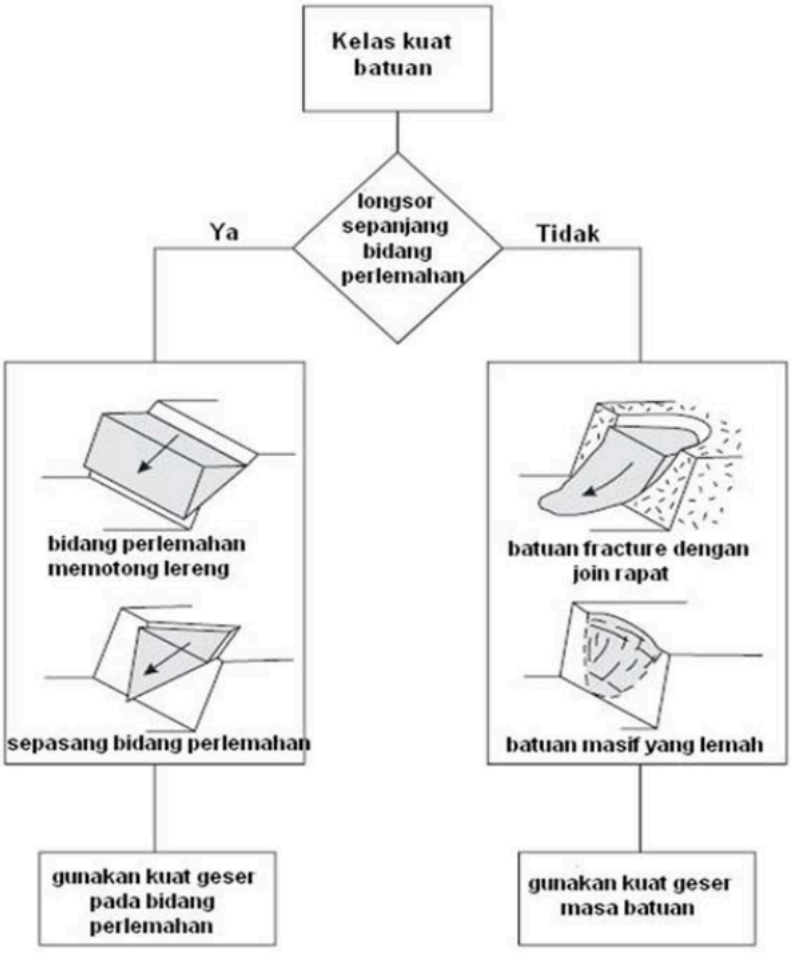
2.4.7. Analisis Lereng Batuan

Stabilitas lereng batuan pada dasarnya sangat dipengaruhi oleh kondisi struktur geologi yang berkembang di lokasi tersebut. Unsur-unsur seperti kekar, sesar, maupun bidang perlapisan memiliki peran penting dalam menentukan tingkat kestabilan lereng. Struktur-struktur tersebut dapat menjadi bidang lemah yang memicu pergeseran atau kelongsoran, sehingga analisis geologi menjadi tahap awal yang krusial dalam menilai potensi kegagalan lereng.

Menurut Hoek & Bray (1981), bentuk kegagalan pada lereng batuan dapat dikategorikan ke dalam beberapa tipe utama, yaitu *plane failure* atau kelongsoran bidang, *wedge failure* atau kelongsoran berbentuk irisan, serta

toppling failure atau gulingan blok batuan. Masing-masing tipe kegagalan ini dipengaruhi oleh orientasi dan hubungan antarbidang diskontinuitas yang terdapat pada massa batuan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai karakteristik geometri bidang lemah sangat diperlukan untuk memperkirakan mekanisme kelongsoran yang mungkin terjadi.

Analisis stabilitas lereng batuan sendiri umumnya dilakukan dengan pendekatan geoteknik yang mengintegrasikan faktor mekanika batuan dan kondisi hidrogeologi. Beberapa parameter penting yang harus diperhatikan dalam analisis ini antara lain kekuatan tekan uniaksial *(uniaxial compressive strength)* dari batuan, arah serta kemiringan bidang diskontinuitas, dan kondisi air tanah yang dapat meningkatkan tekanan pori. Kombinasi dari parameter-parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi faktor keamanan lereng, sehingga dapat diperoleh gambaran yang lebih akurat mengenai tingkat risiko kelongsoran serta langkah mitigasi yang tepat.



Gambar 2. 1 Pola Keruntuhan Dan Penetapan Kuat Batuan Dalam Analisis Stabilitas Lereng

2.4.8. Metode Irisan Dalam Analisis Stabilitas Lereng

Metode irisan *(slice method)* merupakan salah satu pendekatan klasik yang hingga kini tetap menjadi dasar dalam analisis stabilitas lereng. Pendekatan ini termasuk ke dalam kelompok *Limit Equilibrium Method* (LEM), yang berfokus pada keseimbangan antara gaya pendorong dan gaya penahan dalam suatu massa tanah atau batuan yang berpotensi mengalami longsor. Prinsip utama metode ini adalah membagi tubuh lereng menjadi beberapa irisan vertikal atau mendekati vertikal guna memudahkan perhitungan gaya-gaya yang bekerja, seperti berat tanah, gaya normal dan gaya geser pada dasar irisan, gaya interaksi antar-irisan, serta pengaruh tekanan air pori dan beban eksternal (*Geoengineer*, 2023).

Secara umum, metode irisan digunakan untuk menentukan *factor of safety* (FS) lereng dengan membandingkan gaya atau momen penahan terhadap gaya atau momen penggerak. Persamaan keseimbangan yang digunakan dapat mencakup keseimbangan gaya vertikal, gaya horizontal, atau momen. Namun, karena jumlah persamaan keseimbangan tidak mencukupi untuk menentukan semua gaya yang bekerja, maka diperlukan asumsi tambahan terkait besar atau arah gaya antar-irisan. Kondisi ini kemudian melahirkan beragam variasi metode irisan dengan tingkat kompleksitas serta akurasi yang berbeda (IJERT, 2017).

Versi paling sederhana dari metode irisan diperkenalkan oleh Fellenius (1927), yang dikenal sebagai *Ordinary Method of Slices*. Dalam metode ini, gaya antar-irisan diabaikan atau dianggap sejajar dengan dasar irisan. Walaupun pendekatan ini memudahkan proses perhitungan, hasilnya cenderung kurang akurat, khususnya pada geometri lereng yang rumit. Untuk memperbaikinya, Bishop (1955) mengembangkan metode *Modified Bishop* yang mempertahankan keseimbangan momen dan gaya vertikal, tetapi mengabaikan gaya geser antar-irisan. Meski hanya berlaku untuk bidang kegagalan berbentuk lingkaran, metode ini terbukti menghasilkan nilai *factor of safety* (FS) yang lebih realistis dan banyak digunakan dalam rekayasa geoteknik (*Geoengineer*, 2023).

Spencer (1967) kemudian mengembangkan metode yang lebih komprehensif dengan mempertimbangkan keseimbangan gaya horizontal, gaya vertikal, dan momen secara bersamaan. Ia mengasumsikan bahwa gaya antar-irisan dapat direpresentasikan oleh gaya resultan yang memiliki arah kemiringan konstan untuk setiap irisan. Pendekatan ini menjadikan metode *Spencer* lebih akurat dan dapat diterapkan pada bidang kegagalan non-lingkaran, meskipun membutuhkan proses iteratif yang lebih kompleks (MDPI, 2020).

Selanjutnya, Morgenstern dan Price (1965) memperkenalkan metode *General Limit Equilibrium* (GLE) yang lebih fleksibel. Metode ini memungkinkan variasi fungsi gaya antar-irisan, baik dari segi besar maupun arah, sehingga dapat digunakan pada bentuk bidang kegagalan yang lebih bebas. Karena memiliki keseimbangan persamaan yang lengkap dan fleksibilitas tinggi, metode *Morgenstern–Price* dianggap sebagai salah satu pendekatan paling

akurat dalam keluarga metode irisan, walaupun perhitungannya lebih rumit secara numerik (Scielo, 2021).

Tingkat ketelitian hasil metode irisan bergantung pada beberapa faktor penting. Pertama, jumlah dan lebar irisan yang digunakan dapat memengaruhi hasil analisis. Spencer (1967) mencatat bahwa peningkatan jumlah irisan dari 16 menjadi 32 hanya memberikan perubahan kecil terhadap nilai faktor keamanan, meskipun nilai optimal bergantung pada bentuk geometri dan kondisi tanah (IGS, 2019). Kedua, asumsi terhadap gaya antar-irisan menjadi faktor pembeda utama antar-metode, di mana semakin realistis asumsi yang digunakan, semakin tinggi pula ketepatan hasil analisis. Ketiga, hampir semua metode irisan didasarkan pada kriteria kekuatan geser *Mohr-Coulomb*, yang dirumuskan sebagai $\tau = c + \sigma' \tan \varphi$, dengan c sebagai kohesi dan φ sebagai sudut geser dalam tanah (*Geoengineer*, 2023).

Selain aspek gaya, tekanan air pori *(pore water pressure)* juga memiliki pengaruh signifikan terhadap stabilitas lereng. Variasi kondisi kejenuhan tanah, gradien hidraulik, dan distribusi tekanan air dapat memengaruhi gaya efektif yang bekerja, sehingga berdampak langsung pada nilai faktor keamanan. Studi yang dilakukan oleh Zhang et al. (2020) menemukan bahwa perubahan tekanan air pori seiring waktu dapat menyebabkan penurunan stabilitas lereng yang cukup besar, terutama pada lapisan dengan perbedaan permeabilitas (Springer, 2020).

Dari sisi keunggulan, metode irisan dikenal memiliki konsep yang sederhana, mudah diterapkan dengan bantuan perangkat lunak, dan efektif untuk analisis awal maupun perbandingan berbagai alternatif desain lereng. Namun, keterbatasan utamanya terletak pada ketergantungan terhadap asumsi gaya antar-irisan, ketidakmampuan menggambarkan deformasi sebelum kegagalan, serta keterbatasannya dalam menangani kondisi kompleks seperti lereng berlapis atau pengaruh dinamis akibat gempa (IJERT, 2017).

Perkembangan terkini menunjukkan bahwa metode irisan terus disempurnakan seiring kemajuan teknologi. Lalicata et al. (2024) mengembangkan algoritma optimasi bidang kegagalan yang mampu menurunkan waktu komputasi hingga 90% dibandingkan metode konvensional.

Penelitian lain mengintegrasikan metode irisan dengan analisis probabilistik dan teknologi kecerdasan buatan untuk memperkirakan risiko longsor secara adaptif (Springer, 2025). Selain itu, pendekatan baru juga mengakomodasi kondisi tanah tak jenuh dan beban dinamis dengan memperbarui formulasi tekanan air pori serta interaksi antar-lapisan (MDPI, 2023).

Dengan demikian, metode irisan tetap menjadi pendekatan fundamental dalam analisis stabilitas lereng. Pemilihan jenis metode yang tepat harus mempertimbangkan kondisi geometri, karakteristik material, serta tujuan analisis yang ingin dicapai. Dalam konteks penelitian akademik, kajian terhadap metode ini perlu menguraikan dasar teoritis, asumsi yang digunakan, serta validasi hasil melalui pengujian lapangan atau simulasi numerik agar memperoleh kesimpulan yang empiris dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

2.4.9. Metode *Bishop* dalam Analisis Stabilitas Lereng

Metode *Bishop* merupakan salah satu pendekatan paling berpengaruh dalam analisis stabilitas lereng yang diperkenalkan oleh Alan W. Bishop pada tahun 1955 melalui publikasinya *The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes*. Metode ini termasuk dalam kelompok *Limit Equilibrium Method* (LEM) dan menerapkan konsep irisan *(slice method)*, di mana massa tanah yang berpotensi mengalami longsor dibagi menjadi beberapa segmen vertikal untuk memudahkan analisis gaya-gaya yang bekerja. Berbeda dengan metode *Fellenius* yang lebih sederhana, *Bishop* memperbaiki formulasi keseimbangan momen dan gaya vertikal sehingga memberikan hasil yang lebih akurat dan realistis untuk berbagai tipe lereng (Bishop, 1955).

Secara prinsip, metode *Bishop* berasumsi bahwa kegagalan lereng umumnya terjadi sepanjang bidang melengkung atau *circular slip surface*. Setiap irisan diasumsikan mengalami pengaruh gaya berat sendiri (W), gaya normal (N), gaya geser (S), dan tekanan air pori (u). Dalam pendekatan ini, gaya geser antaririsan diabaikan, namun keseimbangan gaya vertikal dan momen tetap diperhitungkan. Persamaan metode *Bishop* dinyatakan secara implisit karena *factor of safety* (FS) muncul di kedua sisi persamaan, sehingga

penyelesaiannya memerlukan iterasi numerik hingga mencapai nilai konvergen (*Geoengineer*, 2023).

$$FK = \frac{\sum_{i=1}^{n}(c_i' b_i + (W_i - u_i b_i) tan\phi_i') \frac{1}{m_{\propto i}}}{\sum_{i=1}^{n} W_i \sin \propto_i} \qquad 2.2$$

Di mana:

FK = Faktor keamanan

c_i' = kohesi efektif tanah pada dasar irisan ke-i

b_i = Lebar irisan ke-i

W_i = Berat total irisan ke-i

u_i = Tekanan air pori pada dasar irisan ke-i

ϕ_i' = Sudut gesek dalam efektif tanah pada dasar irisan ke-i

$\propto_i$ = Sudut kemiringan dasar irisan terhadap horizontal

n = Jumlah total irisan

$m_{\propto i}$ = Faktor koreksi yang didefinisikan sebagai : $m_{\propto i} = \cos \propto_i + \frac{tan\phi_i' sin\propto_i}{FK}$

Kelebihan utama metode *Bishop* terletak pada kemampuannya menyeimbangkan antara kesederhanaan dan ketepatan hasil. Walaupun perhitungannya lebih rumit dibanding metode *Fellenius*, hasil yang diperoleh lebih mendekati kondisi aktual lapangan, terutama pada lereng berbentuk busur lingkaran dengan material yang homogen. Berbagai penelitian menyebutkan bahwa nilai faktor keamanan yang dihasilkan metode *Bishop* hanya berbeda kurang dari 5% dibanding metode kompleks seperti *Spencer* dan *Morgenstern–Price* (Journals UTM, 2021). Karena itu, metode ini banyak digunakan dalam perangkat lunak geoteknik seperti *GeoStudio SLOPE/W, PLAXIS*, dan *Slide (Rocscience)*.

Penerapan metode *Bishop* juga terbukti efektif dalam berbagai studi lapangan. Misalnya, penelitian oleh Saputra et al. (2022) menunjukkan bahwa pada lereng tambang batubara di Kalimantan, nilai faktor keamanan meningkat seiring dengan bertambahnya kedalaman lapisan tanah keras. Sementara itu, penelitian Nurhayati dan Pratama (2021) memodifikasi metode *Bishop* dengan memasukkan pengaruh hisapan kapiler *(matric suction)* untuk kondisi tak jenuh,

menghasilkan peningkatan nilai FS dibandingkan kondisi jenuh penuh. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa metode *Bishop* tetap relevan dan fleksibel untuk dikembangkan pada kondisi geoteknik yang lebih kompleks.

Namun demikian, metode *Bishop* memiliki keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, metode ini hanya akurat untuk bidang kegagalan berbentuk lingkaran, sehingga kurang sesuai untuk lereng dengan bidang gelincir tidak beraturan atau non-sirkular. Kedua, karena gaya geser antariris diabaikan, hasilnya bisa kurang representatif pada lereng curam atau berlapis heterogen. Ketiga, sebagai metode *limit equilibrium*, *Bishop* tidak menggambarkan deformasi aktual sebelum terjadinya kegagalan, melainkan hanya mendekati kondisi batas keseimbangan (*Geoengineer*, 2023).

Dalam konteks penelitian akademik, metode *Bishop* memiliki peran penting karena mampu menggabungkan efisiensi analitis dengan dasar teori keseimbangan fisik yang kuat. Oleh sebab itu, penerapan metode ini dalam penelitian skripsi atau tesis perlu memperhatikan kesesuaian antara asumsi dasar dan kondisi lapangan. Analisis sensitivitas terhadap parameter utama seperti kohesi, sudut geser dalam, dan tekanan air pori juga perlu dilakukan untuk memahami pengaruh variasi parameter terhadap nilai faktor keamanan. Selain itu, hasil metode *Bishop* sebaiknya dibandingkan dengan metode lain seperti *Spencer* atau *Morgenstern–Price* untuk memperoleh validasi yang lebih komprehensif (Scielo, 2021).

Secara keseluruhan, metode *Bishop* tetap menjadi salah satu pendekatan paling populer dan andal dalam analisis stabilitas lereng karena keseimbangan antara ketelitian, kemudahan penerapan, serta kompatibilitasnya dengan perangkat lunak modern. Dengan pengembangan lebih lanjut menggunakan pendekatan numerik dan probabilistik, metode ini berpotensi memberikan hasil analisis yang semakin akurat dan aplikatif dalam menjawab tantangan geoteknik di berbagai kondisi lereng.

2.5 Pengaruh Kondisi Hidrogeologi dan Drainase

2.5.1. Peran Air Tanah dan Tekanan Pori terhadap Stabilitas Bendungan

Peran air tanah sangat krusial dalam mempengaruhi stabilitas struktur bendungan, terutama melalui mekanisme tekanan pori. Prinsip tegangan efektif

yang pertama kali dikemukakan oleh Terzaghi (1925) menjadi dasar dari seluruh analisis kekuatan tanah. Dalam formulanya, tegangan efektif (σ′) diperoleh dari selisih antara tegangan total (σ) dan tekanan air pori (u), atau dituliskan sebagai σ′ = σ – u. Tekanan air pori yang meningkat akan menurunkan tegangan efektif, yang pada gilirannya melemahkan kekuatan geser tanah, sehingga menurunkan nilai *factor of safety* (FS).

Fenomena ini semakin kompleks ketika permukaan air waduk mengalami perubahan signifikan, seperti saat pengisian atau pengosongan cepat. Perubahan tersebut menimbulkan distribusi tekanan air pori yang tidak merata di dalam tubuh bendungan, menciptakan kondisi *hysteresis* di mana *factor of safety* (FS) tidak berubah secara linier terhadap waktu. Studi numerik menggunakan perangkat lunak seperti COMSOL dan GeoStudio membuktikan bahwa tekanan pori dan *factor of safety* (FS) bersifat dinamis dan sangat dipengaruhi oleh laju perubahan muka air.

2.5.2. Sistem Drainase dalam Tubuh Bendungan

Sistem drainase internal merupakan salah satu strategi teknis paling penting dalam menjaga kestabilan bendungan. Instalasi drainase *horizontal* atau *sub-horizontal* terbukti efektif dalam menurunkan muka air tanah dan mengurangi tekanan pori di dalam tubuh bendungan. Salah satu pendekatan teoritis yang digunakan untuk memahami perilaku sistem drainase ini adalah persamaan Hooghoudt, yang mengaitkan laju aliran rembesan (Q) dengan parameter seperti permeabilitas material (Kb dan Ka), kedalaman drainase (Dd), serta jarak antar saluran drainase (L).

Penelitian oleh Brontowiyono dkk. menunjukkan bahwa kombinasi antara *cutoff wall* dan sistem drainase *horizontal* mampu menurunkan tekanan angkat *(uplift pressure)* dan gradien keluaran *(exit gradient)* secara signifikan, sehingga mengurangi risiko kelongsoran maupun *piping*.

2.5.3. Evaluasi Efektivitas Sistem Drainase dalam Mengurangi Potensi Kelongsoran

Dalam konteks kestabilan lereng, efektivitas drainase dapat dievaluasi melalui pendekatan analisis sensitivitas global. Studi yang dipublikasikan di *MDPI Mathematics* (2023) mengungkapkan bahwa parameter seperti sudut

geser dalam (φ), kohesi (c), dan kerapatan partikel (ρs) merupakan faktor paling berpengaruh terhadap nilai *factor of safety* (FS). Bahkan, interaksi antara c dan ρs terbukti signifikan ketika kondisi muka air berubah secara drastis.

Menurut Freeze dan Cherry, penurunan muka air secara cepat dapat menyebabkan tekanan pori tetap tinggi karena laju pelepasan air tidak mampu mengimbangi kecepatan penurunan. Kondisi ini menurunkan nilai *factor of safety* (FS) secara tiba-tiba. Namun, sistem drainase yang dirancang dengan baik mampu mempercepat pelepasan air pori, memperkecil nilai gradien dan menjaga kestabilan lereng.

2.6 Rembesan Air dalam Tanah

Rembesan *(seepage)* yang terjadi di dalam tubuh bendungan merupakan salah satu aspek yang sangat menentukan tingkat stabilitas lereng sekaligus keamanan struktur secara keseluruhan. Keberadaan aliran air di antara pori-pori tanah dapat menimbulkan perubahan pada kondisi mekanis tanah, sehingga berpotensi memicu terjadinya penurunan kekuatan lereng. Oleh karena itu, pengendalian rembesan menjadi salah satu fokus utama dalam analisis stabilitas bendungan untuk memastikan konstruksi tetap berfungsi secara optimal dan aman dalam jangka panjang.

Menurut Terzaghi & Peck (1967), rembesan didefinisikan sebagai pergerakan air melalui pori-pori tanah yang terjadi akibat adanya perbedaan energi potensial hidraulik. Mekanisme ini pada dasarnya merupakan proses alami, namun dapat menimbulkan masalah serius apabila berlangsung secara tidak terkendali. Aliran air yang berlebihan akan meningkatkan tekanan air pori *(pore water pressure)*, sehingga mengurangi kekuatan geser tanah yang berperan sebagai gaya penahan pada lereng.

Apabila kondisi tersebut dibiarkan, dampaknya bisa sangat signifikan. Selain menurunkan stabilitas lereng, rembesan yang tidak terkontrol juga dapat memicu terjadinya kelongsoran atau bahkan kegagalan hidraulik, salah satunya berupa *piping*, yaitu erosi internal pada tubuh bendungan. Fenomena ini sering kali menjadi penyebab utama keruntuhan bendungan di berbagai kasus kegagalan struktur air. Dengan demikian, pemantauan dan perencanaan sistem drainase yang

baik sangat penting untuk mengendalikan rembesan dan menjaga keamanan konstruksi.

Dalam konteks penelitian ini, rembesan ditempatkan sebagai salah satu variabel independen yang berpengaruh signifikan terhadap *factor of safety* (FS), yang berfungsi sebagai variabel dependen. Melalui pendekatan ini, analisis dapat menjelaskan sejauh mana rembesan berperan dalam menurunkan nilai *factor of safety* (FS), sekaligus memberikan gambaran lebih jelas mengenai hubungan antara kondisi hidrogeologi dengan potensi kelongsoran pada tubuh bendungan.

2.6.1. Daya Rembesan *(Permeability)*

Permeabilitas (k) didefinisikan sebagai kemampuan suatu massa tanah untuk meloloskan air melalui jaringan pori-porinya. Besarnya nilai k tidak bersifat konstan, melainkan sangat dipengaruhi oleh karakteristik tanah itu sendiri, seperti ukuran butiran, tingkat gradasi, dan susunan struktur partikel (Das, 2011). Oleh karena itu, tanah dengan butiran kasar dan pori-pori besar umumnya memiliki nilai *permeabilitas* yang lebih tinggi dibandingkan tanah berbutiran halus dengan pori-pori rapat.

Dalam praktiknya, SNI 8460:2017 menjelaskan bahwa uji *permeabilitas* dapat dilakukan baik di laboratorium maupun di lapangan. Metode laboratorium yang umum digunakan adalah uji *constant head* dan *falling head*, sedangkan di lapangan pengujian dapat dilakukan melalui *pumping test* untuk memperoleh gambaran nyata mengenai aliran air di bawah kondisi alami. Pemilihan metode uji biasanya disesuaikan dengan jenis tanah yang diuji, skala proyek, serta kebutuhan akurasi hasil.

Untuk memberikan kejelasan dalam penelitian, *permeabilitas* ditetapkan sebagai variabel dengan indikator berupa koefisien rembesan (dinyatakan dalam satuan cm/s). Instrumen yang digunakan dalam pengukuran mencakup uji laboratorium standar seperti ASTM D2434, serta *piezometer* lapangan untuk memantau kondisi hidrogeologi secara langsung. Variabel ini dikategorikan dalam skala rasio/interval, sehingga memungkinkan analisis kuantitatif yang lebih presisi terhadap pengaruh *permeabilitas* terhadap stabilitas lereng.

Hubungannya dengan stabilitas bendungan, semakin tinggi nilai permeabilitas tanah pada inti atau tubuh bendungan, semakin besar pula potensi

terjadinya rembesan. Kondisi tersebut dapat meningkatkan tekanan air pori, mengurangi kekuatan geser tanah, dan pada akhirnya menurunkan nilai *factor of safety* (FS). Oleh karena itu, pengendalian *permeabilitas* melalui desain material maupun sistem drainase menjadi aspek krusial dalam menjaga keamanan dan keandalan konstruksi bendungan.

2.6.2. Rembesan Air di Lapangan

Rembesan yang terjadi di lapangan sangat dipengaruhi oleh gradien hidrolik *(hydraulic gradient)* serta kondisi hidrogeologi di sekitar bendungan. Ketika nilai gradien hidrolik melebihi batas kritis (icr), tanah dapat mengalami kondisi tidak stabil yang ditandai dengan munculnya fenomena *boiling* atau *piping* (Kramer, 1996). Fenomena ini berbahaya karena dapat menimbulkan erosi internal yang berujung pada kerusakan struktur bendungan. Untuk mencegah hal tersebut, SNI 8460:2017 menetapkan bahwa setiap bendungan harus dilengkapi dengan sistem drainase yang efektif. Sistem ini berfungsi mengendalikan aliran rembesan agar tetap berada dalam batas aman sehingga tidak membahayakan stabilitas lereng.

Dalam penelitian ini, debit rembesan (q) didefinisikan sebagai variabel yang diamati untuk menilai potensi aliran air melalui tubuh bendungan. Indikator yang digunakan adalah laju aliran rembesan, yang biasanya dinyatakan dalam satuan m^3/s per meter panjang bendungan. Pengukuran debit dilakukan dengan menggunakan instrumen khusus, seperti *flowmeter, weir box*, atau alat ukur debit lainnya yang dirancang untuk memantau volume aliran secara akurat.

Secara metodologis, variabel debit rembesan dikategorikan dalam skala rasio, sehingga memungkinkan analisis kuantitatif terhadap besar kecilnya aliran yang terjadi. Keterkaitannya dengan variabel lain sangat erat, karena semakin besar debit rembesan yang melewati tubuh bendungan, semakin tinggi pula tekanan air pori (u) yang terbentuk di dalam tanah. Kondisi ini pada akhirnya akan menurunkan nilai *factor of safety* (FS), sehingga meningkatkan risiko kelongsoran maupun kegagalan hidraulik. Oleh sebab itu, pemantauan debit rembesan menjadi langkah penting dalam sistem evaluasi keselamatan bendungan.

2.6.3. Analisis Aliran Debris

Aliran rembesan yang terjadi pada bendungan tidak selalu hanya berupa air jernih, tetapi sering kali juga membawa partikel halus dari material tanah. Fenomena ini dikenal dengan istilah *internal erosion* atau *piping* (Fell et al., 2015). Proses tersebut merupakan salah satu bentuk erosi internal yang berbahaya, karena secara perlahan mengurangi integritas material penyusun bendungan tanpa menimbulkan gejala visual yang langsung terlihat.

Kehilangan partikel halus akibat rembesan memiliki dampak serius terhadap kondisi tubuh bendungan. Partikel yang terbawa aliran akan meninggalkan rongga-rongga di dalam tanah, sehingga struktur menjadi lebih longgar dan mudah ditembus oleh air. Akibatnya, nilai permeabilitas tanah meningkat, sementara kemampuan tanah untuk menahan gaya geser menurun. Dalam jangka panjang, kondisi ini berpotensi mempercepat penurunan stabilitas bendungan dan meningkatkan risiko kegagalan struktur.

Dalam penelitian ini, fenomena tersebut direpresentasikan melalui variabel indeks erodibilitas tanah. Indikator yang digunakan adalah persentase partikel halus yang terbawa oleh aliran rembesan, yang dapat dijadikan ukuran kuantitatif tingkat kerentanan tanah terhadap erosi internal. Instrumen yang umum dipakai untuk menguji parameter ini antara lain *pin-hole test* dan *crumb test*, yang dirancang untuk mensimulasikan kondisi aliran air melalui tanah.

Variabel indeks erodibilitas ini dikategorikan dalam skala rasio, karena menghasilkan data numerik yang memungkinkan analisis kuantitatif. Dengan demikian, semakin tinggi persentase partikel halus yang terbawa, semakin tinggi pula tingkat erodibilitas tanah, yang pada akhirnya akan berdampak pada penurunan faktor keamanan bendungan. Oleh sebab itu, pemantauan erodibilitas menjadi aspek penting dalam sistem evaluasi keamanan jangka panjang bendungan.

2.7 Peran Perangkat Lunak GeoStudio dalam Analisis Geoteknik

2.7.1. GeoStudio

Perangkat lunak *GeoStudio* merupakan salah satu paket program yang secara luas digunakan dalam analisis geoteknik. Aplikasi ini terdiri atas berbagai modul dengan fungsi yang berbeda, di antaranya *SLOPE*/W yang berfokus pada

analisis stabilitas lereng serta *SEEP*/W yang digunakan untuk menganalisis aliran rembesan dalam tanah. Kedua modul tersebut saling melengkapi, sehingga dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai kondisi stabilitas lereng bendungan yang dipengaruhi oleh faktor geoteknik maupun hidrogeologi.

Modul *SLOPE*/W bekerja dengan pendekatan *Limit Equilibrium Method* (LEM). Beberapa metode yang umum digunakan di dalamnya mencakup metode *Bishop, Janbu*, dan *Morgenstern-Price*, yang dirancang untuk menghitung *factor of safety* (FS) lereng. Perhitungan ini didasarkan pada parameter sifat tanah, seperti kohesi, sudut geser dalam, dan berat volume tanah, serta mempertimbangkan geometri lereng dan kondisi hidrologi yang ada (Griffiths & Lane, 1999). Dalam penelitian ini, FS diposisikan sebagai variabel dependen yang dihitung dengan memanfaatkan data hasil uji lapangan maupun laboratorium sebagai input.

Sementara itu, modul *SEEP*/W difungsikan untuk memodelkan pola aliran air tanah *(groundwater seepage)* yang melewati tubuh bendungan. Analisis ini mencakup distribusi tekanan air pori *(pore water pressure)* dan perhitungan debit rembesan (q), yang keduanya sangat berpengaruh terhadap stabilitas struktur. Menurut Krahn (2004), hasil simulasi dari *SEEP*/W dapat diintegrasikan dengan *SLOPE*/W, sehingga pengaruh rembesan terhadap nilai FS dapat dianalisis secara lebih mendalam. Dalam konteks penelitian, debit rembesan (q) serta tekanan air pori (u) digunakan sebagai variabel independen yang dianalisis kontribusinya terhadap faktor keamanan lereng.

Penggunaan *GeoStudio* dalam penelitian ini selaras dengan ketentuan SNI 8460:2017, yang mengharuskan analisis stabilitas lereng dan rembesan dilakukan melalui metode kuantitatif berbasis parameter geoteknik dan hidrogeologi. Dengan demikian, hasil analisis yang diperoleh tidak hanya memenuhi standar nasional, tetapi juga memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk menilai risiko kelongsoran serta menyusun strategi mitigasi yang tepat.

2.7.2. Studi Terdahulu Terkait Penggunaan *SLOPE*/W dan *SEEP*/W

Sejumlah penelitian sebelumnya telah membuktikan bahwa penggunaan perangkat lunak *GeoStudio* sangat efektif dalam analisis stabilitas bendungan maupun lereng. Temuan-temuan tersebut menjadi landasan penting yang

menunjukkan bahwa pendekatan berbasis perangkat lunak mampu memberikan hasil yang lebih komprehensif dibandingkan perhitungan manual semata.

Hardiyatmo (2012) mengemukakan bahwa modul *SLOPE*/W dapat menghasilkan estimasi *factor of safety* (FS) dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh kemampuannya dalam mempertimbangkan interaksi antar parameter tanah secara simultan, yang sering kali diabaikan dalam metode manual. Dengan demikian, hasil analisis menjadi lebih representatif terhadap kondisi lapangan.

Penelitian lain oleh Rahardjo et al. (2007) menunjukkan efektivitas modul *SEEP*/W dalam menganalisis pengaruh fluktuasi muka air tanah terhadap kestabilan lereng di wilayah beriklim tropis. Modul ini terbukti mampu mensimulasikan kondisi jenuh dan tidak jenuh secara lebih realistis, sehingga memberikan gambaran yang akurat mengenai perilaku tanah dalam menghadapi perubahan hidrologi.

Selain itu, Fell et al. (2015) menegaskan pentingnya integrasi antara *SLOPE*/W dan *SEEP*/W dalam studi bendungan. Melalui kombinasi kedua modul tersebut, hubungan antara rembesan air dengan potensi kelongsoran dapat dipahami secara lebih menyeluruh. Integrasi ini memberikan keunggulan dibandingkan analisis terpisah, karena memperlihatkan keterkaitan langsung antara faktor hidrogeologi dan stabilitas geoteknik.

Berdasarkan hasil penelitian terdahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa penggunaan *GeoStudio* memberikan reliabilitas analisis yang lebih tinggi dibandingkan pendekatan manual. Hal ini menjadikan perangkat lunak ini sebagai salah satu alat utama yang layak digunakan dalam penelitian maupun praktik rekayasa geoteknik, khususnya pada analisis bendungan dan lereng.

2.8 Studi Terdahulu yang Relevan

Berbagai studi sebelumnya telah dilakukan untuk mengevaluasi faktor-faktor yang memengaruhi kestabilan lereng pada bendungan urugan. Berikut ini adalah ringkasan dari beberapa penelitian yang relevan, lengkap dengan temuan, metode, serta kontribusinya terhadap pengembangan kajian ini.

1. Ekasari et al. (2022) meneliti stabilitas tubuh Bendungan Banyu Urip menggunakan GeoStudio 2018. Dengan memanfaatkan metode Bishop untuk

menganalisis berbagai kondisi seperti normal, banjir, dan *rapid drawdown*, mereka menemukan bahwa meskipun *factor of safety* (FS) selalu berada di atas 1,5, skenario *rapid drawdown* menunjukkan kecenderungan penurunan nilai FS. Namun, penelitian ini belum mempertimbangkan pengaruh tekanan air pori dan gempa, serta tidak memfokuskan kajian pada bendungan pelana.

2. Huda et al. (2019) mengevaluasi rembesan dan tekanan air pori pada Bendungan Panohan menggunakan data dari *piezometer*, *v-notch*, dan simulasi *SEEP*/W. Mereka mencatat bahwa saat muka air tinggi, debit rembesan melampaui ambang batas aman, yang mengindikasikan potensi terjadinya *piping*. Meski mendalami aspek rembesan dan tekanan air pori, penelitian ini tidak menyertakan analisis stabilitas lereng secara menyeluruh.
3. Rahayu & Permana (2021) menganalisis stabilitas lereng Bendungan Cipanas terhadap fluktuasi muka air. Hasilnya menunjukkan nilai *factor of safety* (FS) yang tetap aman (>1,88), namun mereka menggaris bawahi kemungkinan terjadinya longsoran translasi. Kelemahan studi ini adalah tidak melibatkan faktor rembesan dan tekanan air pori, serta belum mempertimbangkan beban gempa.
4. Zain et al. (2023) menyoroti pengaruh urutan penimbunan terhadap kestabilan struktur bendungan urugan. Simulasi GeoStudio menunjukkan bahwa peningkatan tinggi timbunan tanpa disipasi tekanan air pori menyebabkan penurunan *factor of safety* (FS) secara bertahap. Fokus studi ini lebih pada fase konstruksi, bukan kondisi operasional, dan belum mengeksplorasi pengaruh beban gempa atau fluktuasi hidrologi.
5. Frinandy & Ismadi (2023) melakukan evaluasi kondisi tubuh Bendungan Sadawarna berdasarkan hasil monitoring instrumentasi geoteknik seperti *piezometer* dan *inclinometer*. Meskipun alat berfungsi dengan baik, hasil pengukuran menunjukkan kondisi waspada akibat peningkatan tekanan air pori. Namun, penelitian ini tidak menyertakan analisis numerik kestabilan lereng secara langsung.
6. Nisa et al. (2023) menilai stabilitas dan menyusun rencana rehabilitasi untuk Bendung Margopadang menggunakan Plaxis V20. Studi ini mengombinasikan analisis tekanan dan deformasi struktur. Walau menggunakan pendekatan

numerik yang komprehensif, objek kajian mereka adalah bendung, bukan bendungan pelana, sehingga konteksnya berbeda.

7. Fitria & Saputra (2021) meneliti efektivitas filter dan sistem drainase pada bendungan urugan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kerusakan pada filter menyebabkan peningkatan rembesan yang signifikan, yang berpotensi memicu kelongsoran. Meski relevan, studi ini tidak mengkaji hubungan antara rembesan dengan stabilitas lereng secara menyeluruh.
8. Ariyanto & Wijayanto (2022) menganalisis pengaruh variasi parameter tanah terhadap nilai FS pada bendungan urugan menggunakan Plaxis 2D. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai *factor of safety* (FS) sangat sensitif terhadap perubahan kohesi dan sudut geser, terutama pada kondisi jenuh air. Namun, aspek lain seperti rembesan dan beban gempa tidak dibahas.
9. Ramdani & Gunawan (2022) fokus pada pengaruh beban gempa terhadap stabilitas bendungan. Dengan pendekatan *pseudo-static* menggunakan GeoStudio, mereka menemukan bahwa nilai *factor of safety* (FS) bisa turun hingga 30% saat gempa dengan koefisien seismik 0,1. Studi ini penting, namun belum mengintegrasikan kondisi aktual seperti tekanan air pori dan rembesan.
10. Purnomo & Lestari (2021) meneliti stabilitas lereng pada kondisi *rapid drawdown*. Menggunakan simulasi skenario penurunan muka air dalam 3 hingga 7 hari, mereka menemukan bahwa kondisi tersebut menyebabkan penurunan *factor of safety* (FS) yang cukup drastis. Studi ini menyoroti pentingnya perkuatan lereng, tetapi belum mempertimbangkan pengaruh rembesan dan tekanan air pori secara bersamaan.

2.8.1. Tinjauan Studi Kelongsoran pada Bendungan Sejenis

Sejumlah studi terdahulu memberikan wawasan penting mengenai keruntuhan lereng pada bendungan urugan, terutama melalui pendekatan probabilistik yang mempertimbangkan ketidakpastian parameter geoteknik. Salah satu contohnya adalah penelitian oleh Alitabar et al. (2021) di *Alborz Dam*, Iran**,** yang menggunakan simulasi Monte Carlo untuk memperhitungkan kekuatan geser tanah (c' dan φ') sebagai variabel acak. Hasilnya menunjukkan bahwa meskipun analisis deterministik memberikan nilai *factor of safety* (FS) di atas batas aman, *probability of failure* (Pf) tetap signifikan. Hal ini menegaskan

bahwa pendekatan deterministik dapat menutupi risiko laten, terutama pada kondisi tanah dengan variabilitas tinggi.

Studi serupa yang dipublikasikan oleh MDPI (2023) mengaplikasikan pendekatan *Random Finite Element Method* (RFEM) dipadukan dengan teknik *Strength Reduction Method* (SRM)**.** Penelitian ini menyoroti bahwa variasi spasial parameter kekuatan geser tanah dapat menghasilkan zona kegagalan yang tidak terdeteksi dalam model deterministik biasa. Pendekatan ini memberikan gambaran yang lebih realistis tentang risiko longsor, terutama pada bendungan urugan dengan kondisi geoteknik yang tidak seragam.

2.8.2. Tinjauan Studi Kasus di Bendungan Ir. H. Djuanda

Dalam konteks Indonesia, salah satu studi representatif dilakukan oleh Vivik & Mulyawati (2023) terhadap struktur *tailrace* di Bendungan Ir. H. Djuanda. Penelitian ini menggabungkan pendekatan uji tak merusak *(non-destructive testing*/ NDT*)* dengan simulasi numerik menggunakan Plaxis 2D. NDT dilakukan menggunakan *Schmidt hammer* untuk mengukur kekuatan tekan beton, sedangkan Plaxis digunakan untuk menganalisis tegangan dan deformasi pada struktur. Hasil analisis menunjukkan nilai FS sebesar 1,795**,** yang menunjukkan kondisi aman secara struktural, meskipun ditemukan indikasi rembesan mikro. Studi ini menegaskan pentingnya integrasi antara pengukuran lapangan dan simulasi numerik dalam menilai performa komponen bendungan berbahan beton.

2.8.3. Identifikasi *Gap* Riset dan Relevansi terhadap Penelitian Saat Ini

Berdasarkan penelusuran literatur, terdapat beberapa celah penelitian *(research gap)* yang dapat dijadikan pijakan untuk memperluas studi ke wilayah yang belum banyak dibahas:

Tabel 2. 3 *Gap* Penelitian

Gap Penelitian	Penjelasan
Ketidakpastian Parameter Material Tanah	Analisis probabilistik seperti Monte Carlo dan RFEM terbukti efektif untuk memahami risiko kegagalan, namun belum pernah diterapkan secara khusus pada Bendungan Pelana Pasirgombong Timur.

Gap Penelitian	Penjelasan
Analisis Terpadu NDT dan Simulasi pada Bendungan Urugan	Studi terdahulu hanya fokus pada bagian beton *(tailrace)*, sementara tubuh bendungan tanah atau urugan belum banyak dikaji menggunakan kombinasi uji lapangan dan simulasi numerik.
Model Stokastik Tekanan Pori dan Rembesan	Belum ada pendekatan yang secara eksplisit mengaitkan ketidakpastian kondisi hidrogeologi (tekanan air pori, rembesan) dengan distribusi stokastik nilai FS di tubuh bendungan urugan.

Dengan mengacu pada *gap* tersebut, penelitian ini diarahkan untuk mengisi kekosongan terhadap kestabilan bendungan, khususnya dengan memperhitungkan variabilitas alami tanah dan pengaruh fluktuasi hidrogeologi secara simultan dalam model statistik.

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Desain Penelitian

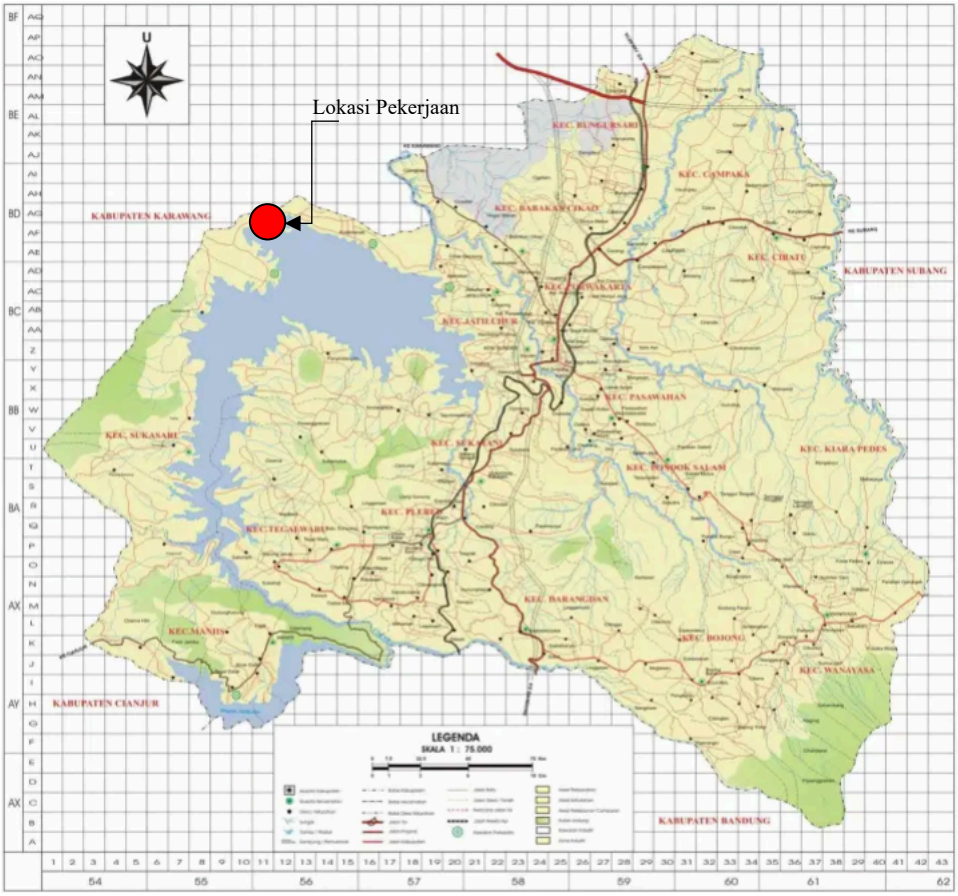
Penelitian ini menerapkan desain studi kasus dengan pendekatan kuantitatif–analitis. Pendekatan studi kasus dipilih karena kajian difokuskan pada satu objek tertentu, yaitu Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur yang merupakan bagian dari Bendungan Ir. H. Djuanda Jatiluhur, dan telah mengalami kejadian kelongsoran pada tubuh bendungan. Melalui desain ini, penelitian diarahkan untuk memahami fenomena kelongsoran secara mendalam dengan mempertimbangkan kondisi teknis, geoteknik, dan hidrologi yang spesifik di lokasi penelitian.

Penelitian bersifat deskriptif sekaligus evaluatif. Kondisi eksisting tubuh bendungan dijabarkan berdasarkan data teknis yang tersedia, kemudian dievaluasi secara kuantitatif melalui pemodelan numerik. Analisis dilakukan untuk menilai tingkat stabilitas lereng dengan menghitung nilai faktor keamanan *factor of safety* (FS), serta untuk mengkaji pengaruh rembesan dan tekanan air pori terhadap potensi terjadinya kelongsoran.

Pendekatan kuantitatif digunakan karena penelitian ini didasarkan pada data numerik yang meliputi parameter geoteknik, geometri tubuh bendungan, dan kondisi hidrologi. Data tersebut selanjutnya diolah dan dianalisis menggunakan perangkat lunak geoteknik GeoStudio, khususnya modul *SEEP*/W untuk analisis rembesan dan *SLOPE*/W untuk analisis stabilitas lereng. Hasil analisis kemudian dibandingkan dengan kriteria keamanan bendungan yang berlaku guna menilai tingkat kestabilan lereng tubuh bendungan.

Dengan demikian, penelitian ini tidak dimaksudkan untuk menguji hipotesis statistik, melainkan untuk menganalisis dan mengevaluasi kondisi teknis kestabilan lereng bendungan berdasarkan pendekatan rekayasa geoteknik.

3.2 Lokasi Penelitian



Gambar 3. 1 Lokasi Longsor
https://teguhaditya.wordpress.com/2011/11/08/peta-administrasi-kabupaten-purwakarta/

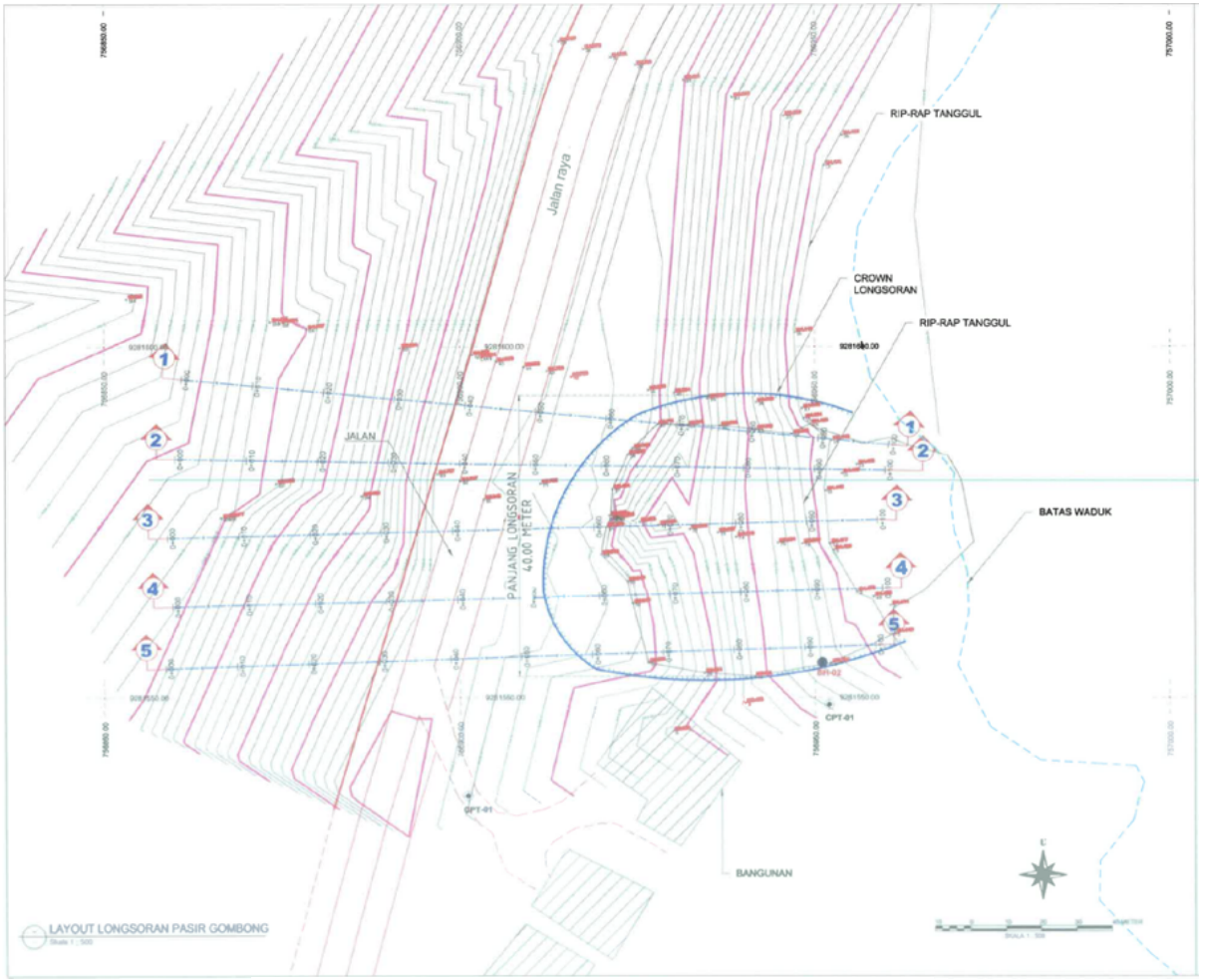
Penelitian ini dilaksanakan di Bendungan Pelana Pasirgombong Timur yang terletak dalam wilayah administratif Kabupaten Purwakarta, Provinsi Jawa Barat. Secara geografis, area penelitian berada pada koordinat 6°30'21.1" Lintang Selatan dan 107°18'21.6" Bujur Timur, yang mewakili posisi utama tubuh bendungan beserta area di sekitarnya. Lokasi tersebut menjadi fokus utama dalam analisis kestabilan lereng serta kajian geoteknik yang berkaitan dengan kondisi tanah dan struktur bendungan.

Secara fungsional, Bendungan Pelana Pasirgombong Timur merupakan bagian integral dari sistem pengairan dan pengelolaan sumber daya air yang berada di bawah tanggung jawab Perum Jasa Tirta II. Karakteristik topografi di sekitar bendungan cenderung berbukit dengan dominasi material tanah lempung berpasir. Kondisi ini, secara geoteknis, menunjukkan potensi penurunan stabilitas lereng

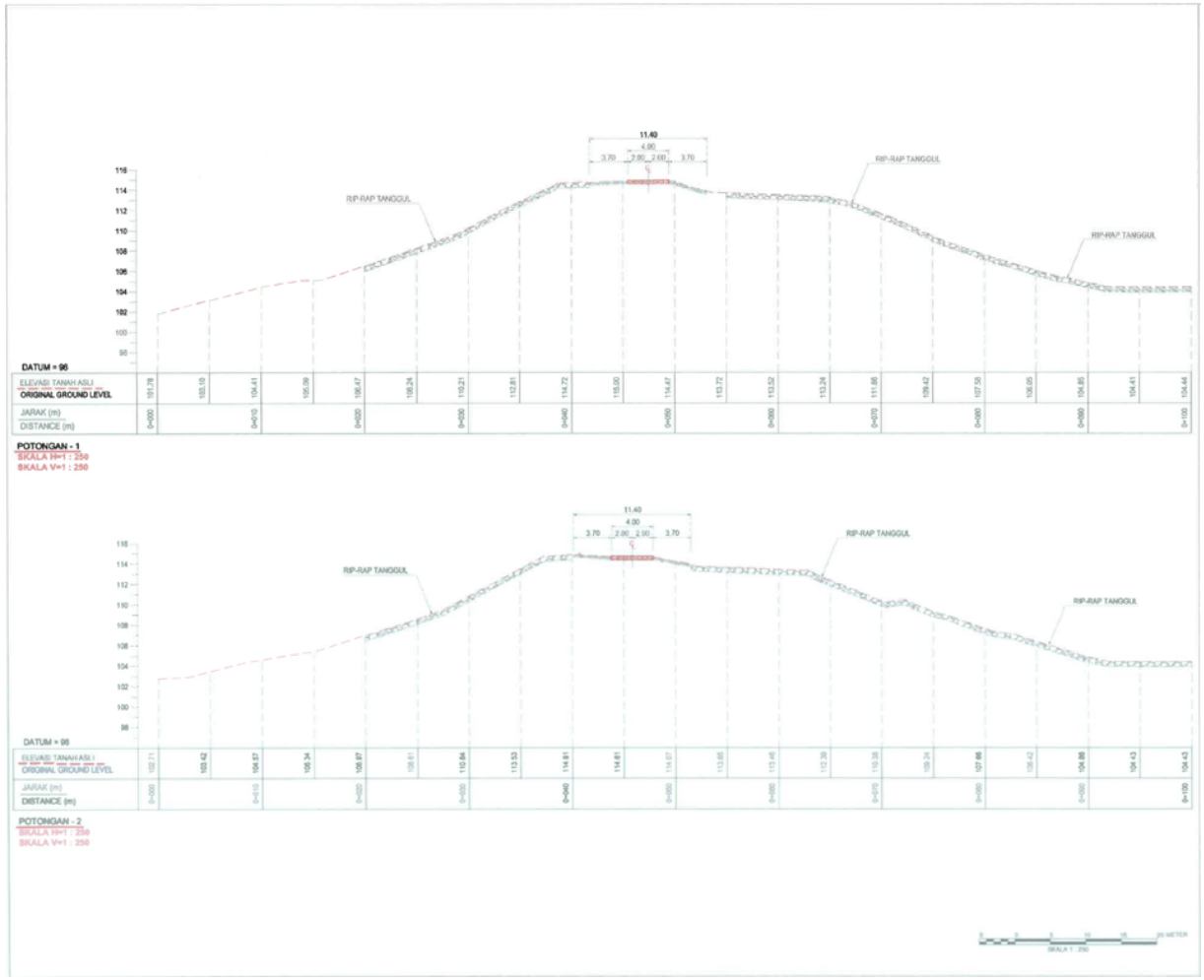
yang dapat dipengaruhi oleh intensitas curah hujan tinggi, karakteristik hidrogeologi setempat, serta aktivitas konstruksi maupun operasional bendungan itu sendiri.

Pemilihan lokasi penelitian didasarkan pada hasil observasi awal yang mengindikasikan adanya tanda-tanda kelongsoran atau deformasi di bagian pelana bendungan. Fenomena tersebut berpotensi memengaruhi kestabilan struktur utama dan tingkat keamanan bendungan secara keseluruhan. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan untuk menganalisis faktor-faktor penyebab terjadinya kelongsoran serta melakukan evaluasi terhadap nilai *factor of safety* (FS) dengan mempertimbangkan parameter geoteknik dan kondisi hidrogeologi di lokasi penelitian.

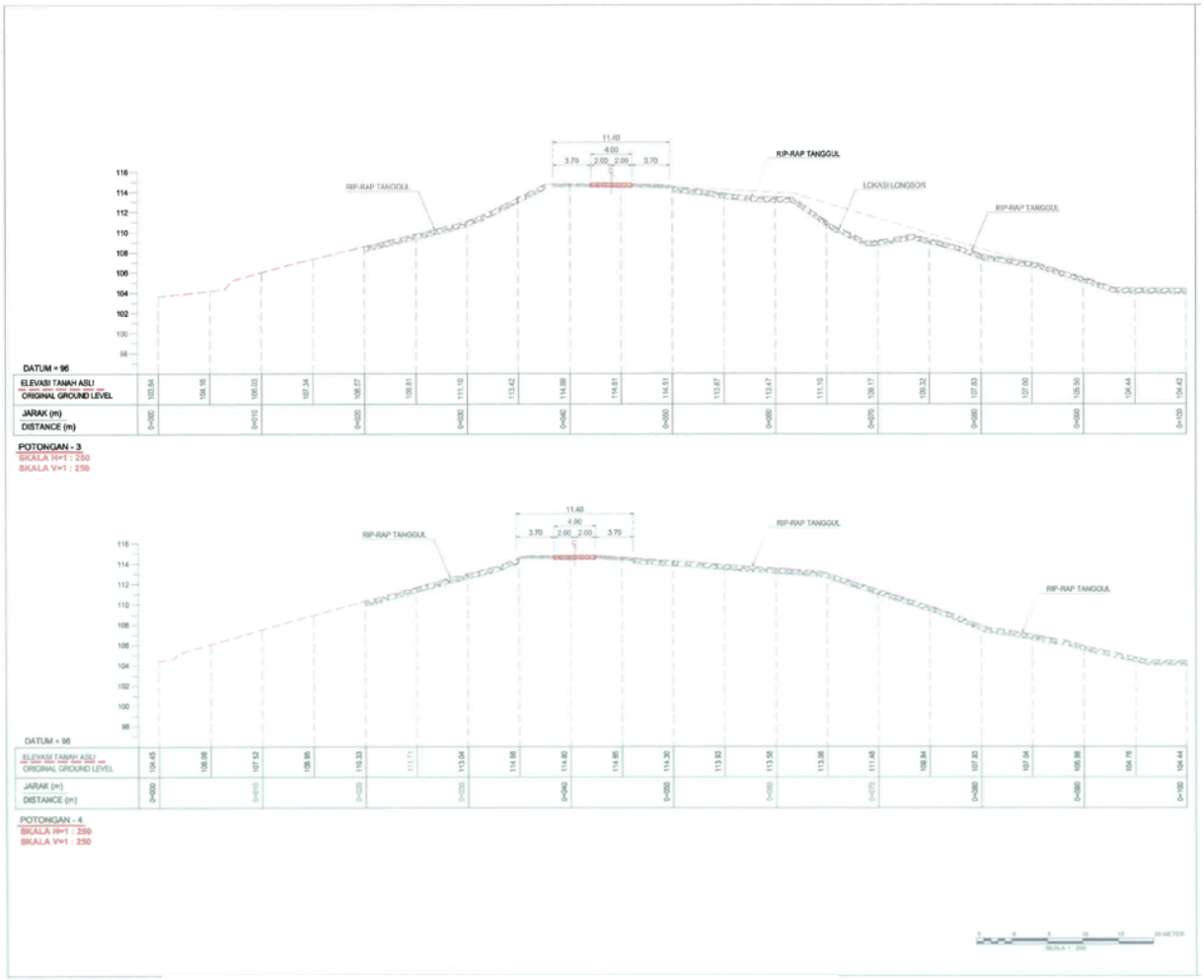
Dengan memperhatikan aspek topografi, sifat fisik tanah, serta kondisi hidrogeologi wilayah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menilai kestabilan lereng tubuh bendungan melalui pendekatan *Limit Equilibrium Method* (LEM), menggunakan kombinasi data hasil pengujian lapangan dan laboratorium tanah. Hasil dari analisis ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis yang berorientasi pada peningkatan keamanan struktur bendungan, sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam SNI 8460:2017 serta pedoman teknis dari Peraturan Menteri PUPR mengenai Keamanan Bendungan.



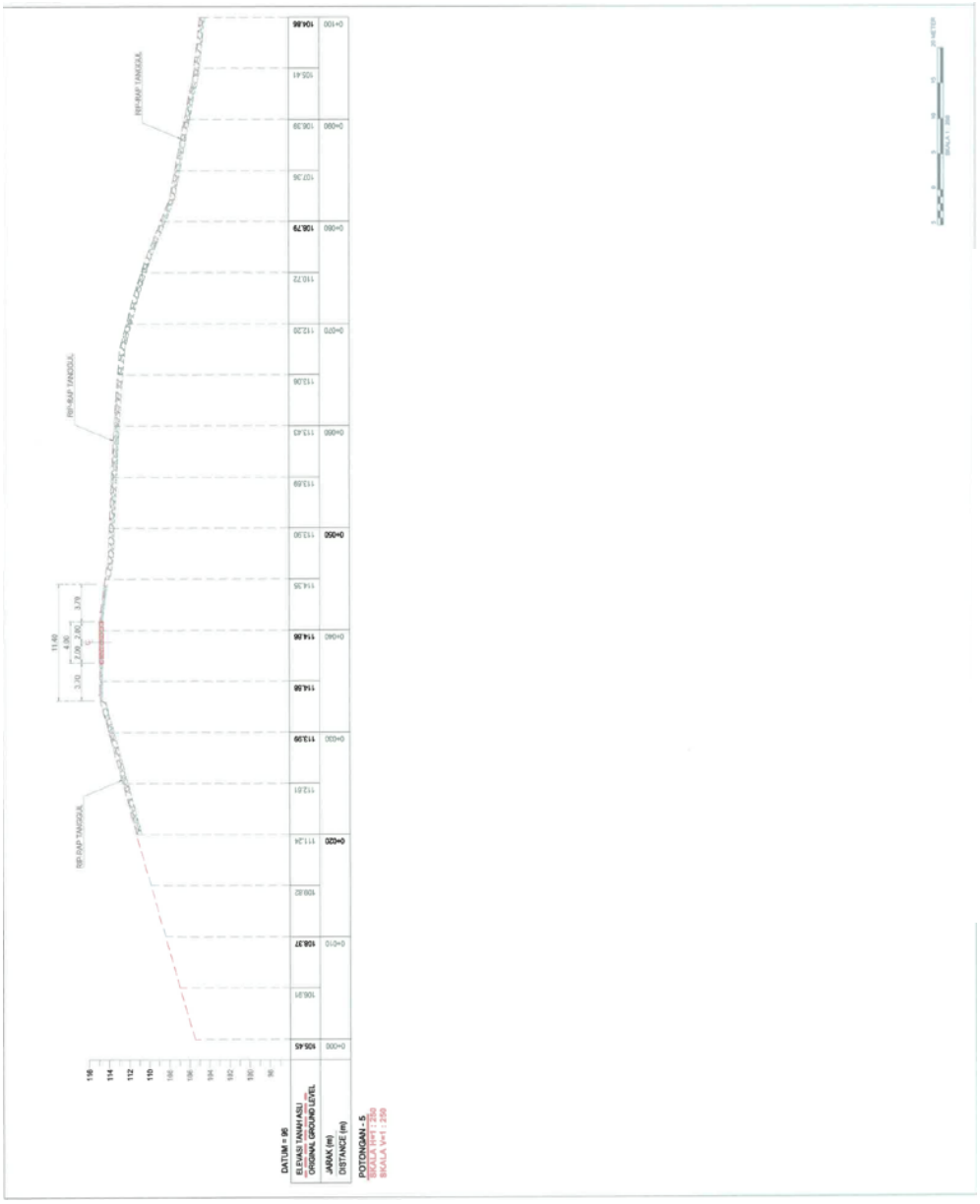
Gambar 3. 2 Layout Longsoran Pasir Gombong



Gambar 3. 3 Gambar Potongan 1 dan 2



Gambar 3. 4 Gambar Potongan 3 dan 4



Gambar 3. 5 Gambar Potongan 5

3.3 Teknik Sampling

Teknik pengambilan sampel yang diterapkan dalam penelitian ini adalah *purposive sampling*. Metode ini dipilih karena objek kajian tidak berupa populasi individu, melainkan kumpulan data teknis dan penampang tubuh bendungan yang memiliki karakteristik tertentu serta relevan dengan tujuan penelitian.

Populasi penelitian mencakup seluruh data teknis yang berkaitan dengan tubuh Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur, meliputi data geometri bendungan, sifat fisik dan mekanik tanah, hasil pengujian lapangan dan laboratorium, serta data

muka air waduk. Namun demikian, tidak seluruh data tersebut dianalisis secara menyeluruh dalam penelitian ini.

Penentuan sampel dilakukan secara purposif dengan mempertimbangkan beberapa kriteria utama, yaitu penampang tubuh bendungan yang berada pada lokasi kejadian kelongsoran atau zona yang terindikasi tidak stabil, penampang dengan kondisi geometri dan parameter geoteknik yang paling kritis, serta penampang yang mewakili kondisi lereng hulu dan lereng hilir bendungan.

Pemilihan sampel menggunakan teknik *purposive sampling* bertujuan untuk memusatkan analisis pada bagian tubuh bendungan yang memiliki potensi kegagalan tertinggi. Dengan pendekatan ini, hasil penelitian diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih representatif mengenai mekanisme kelongsoran serta tingkat keamanan struktur bendungan secara keseluruhan.

3.4 Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian yang digunakan dalam studi ini berupa instrumen teknis dan analitis yang disesuaikan dengan karakteristik penelitian di bidang teknik sipil dan geoteknik. Instrumen yang digunakan tidak berbentuk kuesioner, melainkan berupa kumpulan data teknis, dokumen pendukung, serta perangkat lunak analisis yang relevan.

Instrumen penelitian yang digunakan meliputi:

1. Instrumen Pengumpulan Data
    - Data primer yang diperoleh melalui wawancara dengan pihak pengelola bendungan untuk mendapatkan informasi mengenai kondisi operasional, Riwayat kejadian longsor, serta upaya penanganan yang telah dilakukan.
    - Data sekunder yang diperoleh melalui studi dokumentasi, berupa laporan desain bendungan, data *bor log*, hasil uji laboratorium tanah, data uji lapangan, gambar penampang tubuh bendungan, serta data muka air waduk.
2. Instrumen Analisis
    - Perangkat lunak GeoStudio *SEEP*/W, yang digunakan untuk menganalisis pola rembesan dan distribusi tekanan air pori di dalam tubuh bendungan.

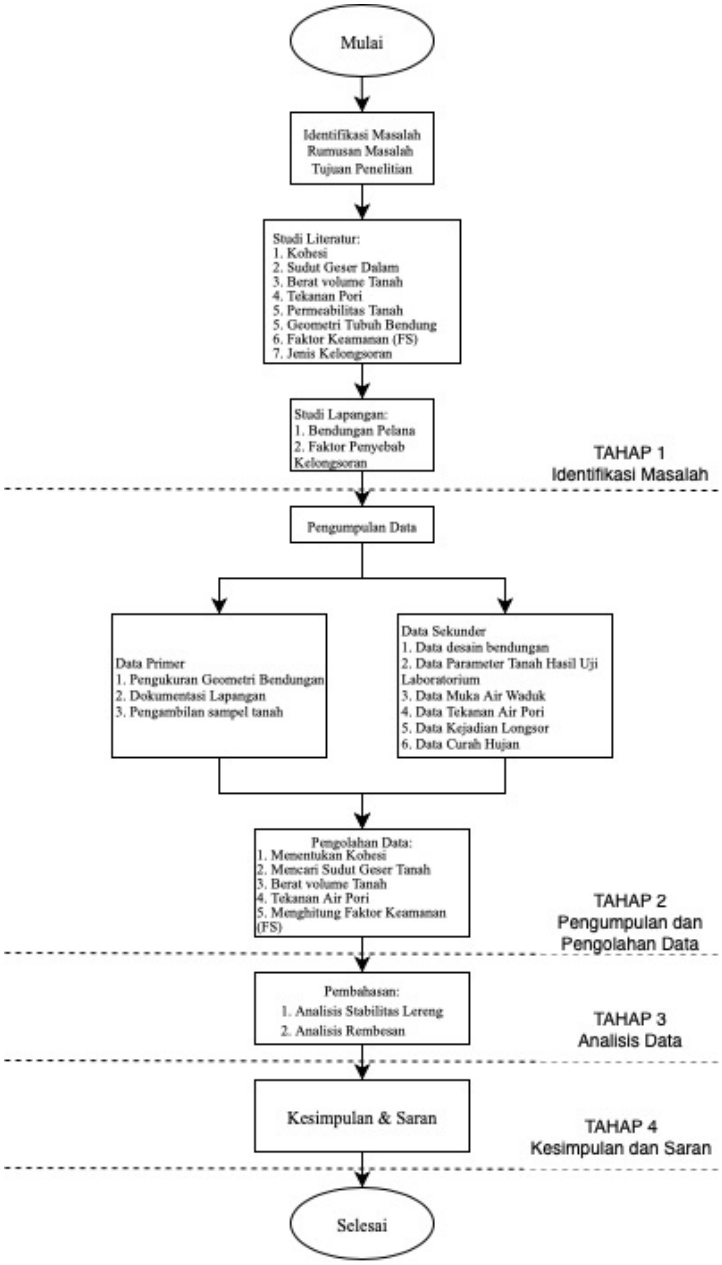
- Perangkat lunak GeoStudio *SLOPE*/W, yang digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng dan menghitung nilai *factor of safety* (FS) pada berbagai kondisi muka air waduk.

Parameter geoteknik yang digunakan sebagai masukan dalam analisis mencakup nilai kohesi tanah, sudut geser dalam, berat isi tanah, serta koefisien permeabilitas. Parameter-parameter ini menjadi dasar utama dalam pemodelan numerik dan digunakan untuk mengevaluasi tingkat kestabilan lereng tubuh bendungan.

Dengan memanfaatkan parameter dan instrumen tersebut, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan analisis yang tersusun secara sistematis, bersifat kuantitatif, serta memiliki tingkat keandalan yang dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

3.5 Alir Penelitian

Metodologi penelitian merupakan suatu rancangan kerja yang tersusun secara sistematis untuk menggambarkan langkah-langkah pelaksanaan penelitian, dimulai dari proses perumusan masalah hingga tahap penarikan kesimpulan. Penyusunan metodologi ini bertujuan untuk menjamin bahwa penelitian dilakukan dengan pendekatan yang ilmiah, terukur, serta memiliki tingkat akurasi dan keabsahan yang dapat dipertanggungjawabkan.



Gambar 3. 6 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.1 memperlihatkan tahapan dari pelaksanaan penelitian ini yang akan dilakukan melalui 4 tahapan yaiut Identifikasi Masalah, Pengumpulan dan Pengolahaan Data, Analisis Data, serta Kesimpulan dan Saran.

3.6 TAHAP 1: Identifikasi Masalah

Tahap awal penelitian ini dimulai dengan kegiatan studi lapangan dan studi literatur, yang keduanya berfungsi sebagai dasar dalam merumuskan arah analisis. Studi lapangan dilaksanakan di Bendungan Pelana Pasirgombong Timur dengan

tujuan utama untuk mengidentifikasi fenomena kelongsoran yang terjadi, sekaligus meninjau kondisi geometri tubuh bendungan secara langsung. Melalui pengamatan ini, peneliti dapat memperoleh gambaran awal mengenai faktor-faktor potensial yang berkontribusi terhadap penurunan stabilitas lereng.

a. Rumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Berdasarkan fenomena kelongsoran yang terjadi pada Bendungan Pelana Pasirgombong Timur, terdapat sejumlah persoalan pokok yang perlu dikaji lebih lanjut. Pertama, bagaimana kondisi parameter geoteknik tanah yang meliputi kohesi, sudut geser dalam, berat volume, dan permeabilitas pada tubuh bendungan Kedua, sejauh mana pengaruh tekanan air pori *(pore water pressure)* serta kondisi rembesan terhadap stabilitas lereng bendungan.

Selanjutnya, perlu dianalisis berapa besar nilai *factor of safety* (FS) tubuh bendungan dengan menggunakan metode analisis stabilitas lereng yang sesuai dengan standar SNI 8460:2017. Selain itu, penting pula untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang paling dominan dalam memicu terjadinya kelongsoran pada tubuh bendungan tersebut.

Terakhir, penelitian ini juga diarahkan untuk merumuskan upaya teknis yang dapat direkomendasikan guna meningkatkan stabilitas lereng serta meminimalkan potensi kelongsoran di masa mendatang. Dengan menjawab pertanyaan-pertanyaan tersebut, penelitian diharapkan mampu memberikan kontribusi nyata terhadap upaya peningkatan keamanan dan keandalan bendungan.

Penelitian ini memiliki beberapa tujuan utama yang ingin dicapai. Pertama, mengidentifikasi kondisi geoteknik tanah Tanggul Pelana pada Bendungan Pasir Gombong Timur melalui serangkaian uji lapangan maupun uji laboratorium. Kedua, menganalisis pengaruh tekanan air pori serta pola rembesan terhadap stabilitas bendungan dengan pendekatan kuantitatif menggunakan perangkat lunak geoteknik, yaitu *GeoStudio SLOPE*/W dan *SEEP*/W.

Selanjutnya, penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan nilai faktor keamanan lereng bendungan berdasarkan ketentuan standar SNI 8460:2017. Selain itu, dilakukan identifikasi terhadap faktor-faktor utama penyebab kelongsoran dengan mempertimbangkan parameter geoteknik dan kondisi hidrogeologi yang ada.

Tujuan terakhir adalah menyusun rekomendasi teknis yang dapat digunakan sebagai dasar perbaikan maupun strategi pemeliharaan, sehingga potensi kelongsoran di masa mendatang dapat diminimalkan dan tingkat keamanan bendungan tetap terjaga.

b. Studi Lapangan

Kegiatan studi lapangan dilaksanakan di Bendungan Pelana Pasirgombong Timur dengan tujuan untuk menelusuri fenomena kelongsoran yang terjadi, menelaah kondisi geometri tubuh bendungan, serta mengenali faktor-faktor potensial yang dapat menjadi pemicu kelongsoran.

c. Studi Literatur

Studi literatur dalam penelitian ini mencakup penelusuran teori-teori yang berhubungan dengan berbagai parameter geoteknik, seperti kohesi, sudut geser dalam, berat volume tanah, permeabilitas, dan tekanan air pori. Selain itu, kajian juga meliputi pembahasan mengenai konsep faktor keamanan serta jenis-jenis kelongsoran yang telah dilaporkan pada penelitian-penelitian terdahulu.

3.7 TAHAP 2: Pengumpulan dan Pengolahan Data

Pengumpulan data merupakan tahap krusial dalam penelitian ini, mengingat kualitas serta kelengkapan data sangat berpengaruh terhadap ketepatan hasil analisis stabilitas lereng tubuh bendungan. Data yang digunakan terdiri atas data primer dan data sekunder, yang diperoleh melalui metode wawancara dan studi dokumentasi. Kedua jenis data tersebut digunakan secara saling melengkapi untuk memberikan gambaran teknis yang menyeluruh mengenai kondisi Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur.

1. Pengumpulan Data Primer

Data primer dalam penelitian ini diperoleh melalui wawancara semi-terstruktur dengan pihak-pihak yang memiliki kompetensi serta keterlibatan langsung dalam kegiatan pengelolaan, pengawasan, dan evaluasi teknis Bendungan Ir. H. Djuanda, khususnya pada Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur.
Wawancara tersebut dilakukan untuk menggali informasi teknis yang belum sepenuhnya terdokumentasi secara tertulis, antara lain:

a) Riwayat kejadian kelongsoran dan indikasi awal ketidakstabilan lereng;

b) Kondisi operasional bendungan pada saat terjadinya longsor, termasuk elevasi muka air waduk;
c) Sistem drainase yang ada dan efektivitasnya dalam mengendalikan rembesan;
d) Tindakan penanganan atau perbaikan yang telah dilakukan pasca kejadian longsor;
e) Pengamatan lapangan terkait perubahan geometri atau kondisi material tubuh bendungan.

Wawancara dilaksanakan secara langsung maupun tidak langsung dengan narasumber yang relevan, seperti petugas teknis bendungan, pengawas lapangan, dan pihak pengelola bendungan. Metode wawancara semi-terstruktur digunakan agar peneliti memiliki kerangka pertanyaan sebagai acuan, sekaligus memberikan ruang fleksibilitas untuk menggali informasi tambahan yang dinilai penting selama proses wawancara.

Data yang diperoleh dari wawancara bersifat kualitatif dan dimanfaatkan sebagai data pendukung dalam menafsirkan hasil analisis numerik. Selain itu, data tersebut digunakan untuk memperkuat pemahaman terhadap kondisi aktual di lapangan.

2. Pengumpulan Data Sekunder

Data sekunder dalam penelitian ini diperoleh melalui studi dokumentasi, yaitu dengan mengumpulkan dan menelaah berbagai dokumen teknis yang berkaitan dengan Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur. Data tersebut berperan sebagai sumber utama dalam pelaksanaan analisis numerik rembesan dan stabilitas lereng.

Dokumen yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

a) Laporan desain dan perencanaan bendungan;
b) Data bor log;
c) Hasil uji laboratorium tanah, seperti nilai kohesi, sudut geser dalam, dan berat volume tanah;
d) Data uji lapangan, seperti hasil *Standar Penetration Test* (SPT):
e) Data geometri tubuh bendungan dan gambar penampang melintang:
f) Data muka air waduk dan kondisi hidrologi:

g) Laporan inspeksi dan evaluasi teknis bendungan:

h) Dokumen terkait kejadian longsor pada tahun 2021.

3.8 TAHAP 3: Analisis Data

Analisis dalam penelitian ini difokuskan untuk menguji tingkat stabilitas lereng sekaligus menilai perilaku rembesan yang terjadi pada tubuh bendungan. Proses analisis tidak hanya bertujuan untuk mengetahui apakah lereng berada dalam kondisi aman atau rawan kelongsoran, tetapi juga untuk memahami bagaimana pola aliran air melalui pori-pori tanah dapat memengaruhi tekanan air pori dan pada akhirnya berkontribusi terhadap perubahan faktor keamanan. Dengan demikian, analisis ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai interaksi antara kondisi geoteknik tanah dan aspek hidrogeologi yang berperan penting dalam menjaga keamanan serta keandalan struktur bendungan.

1. Analisis Stabilitas Lereng menggunakan perangkat lunak seperti GeoStudio *SLOPE*/W, dengan hasil utama berupa *Factor of Safety* (FS).
2. Analisis Rembesan dilakukan dengan metode analisis aliran, baik analitik maupun numerik menggunakan GeoStudio *SEEP*/W, untuk memodelkan distribusi tekanan pori dan debit rembesan.

Mengacu pada SNI 8460:2017**,** analisis stabilitas lereng dilakukan dengan membandingkan nilai *Factor of Safety* (FS). terhadap kriteria standar. Untuk kondisi statis normal, lereng dinyatakan aman apabila nilai *Factor of Safety* (FS) ≥ 1,5, sedangkan pada kondisi gempa, batas aman ditetapkan dengan nilai *Factor of Safety* (FS) ≥ 1,1.

3.9 TAHAP 4: Kesimpulan dan Saran

Tahap penutup dalam penelitian ini berfokus pada penyusunan kesimpulan dan saran sebagai hasil akhir dari keseluruhan proses analisis. Kesimpulan dirumuskan berdasarkan temuan utama penelitian yang diperoleh melalui studi lapangan, uji laboratorium, serta analisis data dengan perangkat lunak geoteknik. Bagian ini memberikan jawaban atas rumusan masalah yang telah ditetapkan sebelumnya sekaligus menegaskan kontribusi penelitian terhadap pengembangan ilmu maupun praktik teknis. Sementara itu, saran disusun sebagai rekomendasi

yang bersifat aplikatif, baik untuk meningkatkan stabilitas bendungan, memperbaiki sistem pemantauan, maupun sebagai acuan bagi penelitian selanjutnya. Dengan demikian, tahap akhir ini tidak hanya merangkum hasil penelitian, tetapi juga memberikan arah yang konstruktif untuk langkah tindak lanjut di masa depan.

a. Kesimpulan

Kesimpulan disusun untuk merangkum temuan utama penelitian, mencakup faktor-faktor yang memicu terjadinya kelongsoran, nilai faktor keamanan aktual yang diperoleh dari analisis, serta pengaruh kondisi hidrogeologi dan parameter tanah terhadap tingkat stabilitas bendungan.

b. Saran

Saran yang diberikan berbentuk rekomendasi teknis, seperti peningkatan efektivitas sistem drainase, upaya perkuatan pada lereng, maupun penambahan sistem monitoring, sehingga stabilitas bendungan dapat tetap terpelihara sesuai standar keamanan yang berlaku.

Berdasarkan ketentuan SNI**,** tahap ini memiliki peran penting sebagai landasan dalam penyusunan rekomendasi mitigasi risiko kelongsoran, sekaligus memberikan kontribusi bagi pengembangan ilmu geoteknik, khususnya dalam aspek perancangan dan evaluasi bendungan.

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Gambaran Umum Kondisi Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur

Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur merupakan salah satu bagian dari sistem Bendungan Ir. H. Djuanda Jatiluhur yang berperan sebagai struktur pengaman tambahan dalam mengendalikan limpasan serta rembesan air pada area pelana. Secara umum, tubuh bendungan pelana ini dibangun dari material urugan tanah, dengan konfigurasi lereng hulu dan lereng hilir yang dirancang untuk menahan beban hidraulik yang berasal dari waduk.

Berdasarkan hasil observasi lapangan dan telaah data teknis yang tersedia, penelitian ini difokuskan pada lereng hulu bendungan pelana, khususnya pada zona yang mengalami kejadian longsor pada 24 Februari 2021. Peristiwa longsor tersebut ditandai oleh pergerakan massa tanah dangkal hingga menengah, dengan kedalaman berkisar antara ±2,4 hingga 4,0 m serta lebar longsoran sekitar ±35 m dan panjang sekitar ±40 m. Karakteristik ini menunjukkan adanya penurunan kestabilan lereng yang dipengaruhi oleh interaksi antara kondisi geoteknik dan faktor hidrologi.

4.2. Kondisi Geometri dan Karakteristik Material Bendungan

4.2.1. Kondisi Geometrik Tubuh Bendungan

Geometri tubuh Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur ditetapkan berdasarkan acuan gambar perencanaan serta hasil pengukuran langsung di lapangan. Secara umum, tubuh bendungan memiliki lereng hulu dengan kemiringan yang relatif landai, sementara lereng hilir dirancang lebih curam guna mengoptimalkan pemanfaatan ruang.

Analisis difokuskan pada beberapa penampang melintang yang dinilai paling kritis berdasarkan hasil inspeksi visual dan catatan kejadian longsor sebelumnya, yaitu penampang 1 hingga penampang 5. Penampang-penampang tersebut selanjutnya dijadikan dasar dalam pemodelan numerik untuk keperluan analisis rembesan dan stabilitas lereng.

4.2.2. Karakteristik Tanah dan Parameter Geoteknik

Berdasarkan interpretasi data *bor log* serta hasil pengujian laboratorium, material penyusun tubuh bendungan umumnya berupa tanah lempung berpasir hingga lanau berlempung dengan tingkat kepadatan sedang. Parameter geoteknik utama yang digunakan dalam analisis meliputi kohesi efektif (c'), sudut geser dalam efektif (φ'), berat isi tanah (γ), dan koefisien permeabilitas (k).

Parameter-parameter tersebut kemudian dijadikan sebagai data masukan dalam pemodelan menggunakan perangkat lunak *SEEP*/W dan *SLOPE*/W untuk mensimulasikan kondisi aliran air (hidraulik) serta mengevaluasi stabilitas lereng bendungan.

Tabel 4. 1 Data Hasil Uji Laboratorium Tanah Eksisting

No	*Sample Type*	*Water Content*	*Unit Weight*	*Dry Density*	*Void Ratio*	*Porosity*	*Specific Gravity*
		Wn	γn	γd	e	n	G_s
		(%)	(gr/cm³)	(gr/cm³)	-	(%)	
Material 1	UDS	21,97	1,96	1,61	0,67	39,97	2,68
Material 2	UDS & DS	18,06	2,05	1,74	0,56	35,87	2,71

Shrinkage Limit	*Grain Size Analysis*				*Atterberg Limit*			
	$Gravel_{(kerikil)}$	$Sand_{(pasir)}$	$Cilt_{(lanau)}$	$Clay_{(Lempung)}$	W_L	W_P	I_P	Class
S_L	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
11,79	0,00	17,31	81,79	0,00	53,79	22,37	31,42	CH
11,66	0,00	37,76	62,24	0,00	28,31	20,98	7,32	CL-ML

Tabel 4. 2 Parameter Tanah Area Pasir Gombong

No	*Depth (m)*	*Layer Name*	*General*				
			N Average	*Soil Model*	*Drainage Type*	*γ unsat*	*γ sat*
						kN/m³	kN/m³
1	0 – 2	*Stiff Clay*	12	*Hardening Soil*	*Undrainde A*	17	18
2	2 – 4	*Hard Clay*	49	*Hardening Soil*	*Undrained A*	19	20
3	4 – 24	*Dense Sand (Gravel)*	60	*Hardening Soil*	*Drained*	20	21

Parameters						Groundwater	
E_{se}^{ref}	E_{oed}^{ref}	E_{ur}^{ref}	cu	c'	Ø'	k_x	k_y
kN/m²	kN/m²	kN/m²	kN/m²	kN/m²	°	m/day	m/day
21000	16800	63000	60	20	20	8.64E-04	8.64E-04
85750	68600	257250	245	50	28	8.64E-04	8.64E-04
60000	48000	180000	-	5	50	1.00E+00	1.00E+00

4.3. Analisis Rembesan Menggunakan *SEEP*/W

Subbab ini menguraikan hasil analisis rembesan pada tubuh Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur yang dilakukan menggunakan perangkat lunak *SEEP*/W.

Dalam pemodelan rembesan menggunakan SEEP/W, kondisi aliran dapat diasumsikan sebagai *steady-state* atau *transient*. Kondisi *steady-state* mengasumsikan bahwa distribusi tekanan air pori tidak berubah terhadap waktu, sehingga aliran berada dalam keadaan seimbang. Asumsi ini umum digunakan untuk merepresentasikan kondisi operasional bendungan dalam jangka panjang.

Sementara itu, kondisi *transient* mempertimbangkan perubahan tekanan air pori terhadap waktu akibat variasi muka air atau hujan. Dalam penelitian ini, analisis rembesan dilakukan dengan asumsi *steady-state*, karena bertujuan untuk melihat debit aliran rembesan pada Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur.

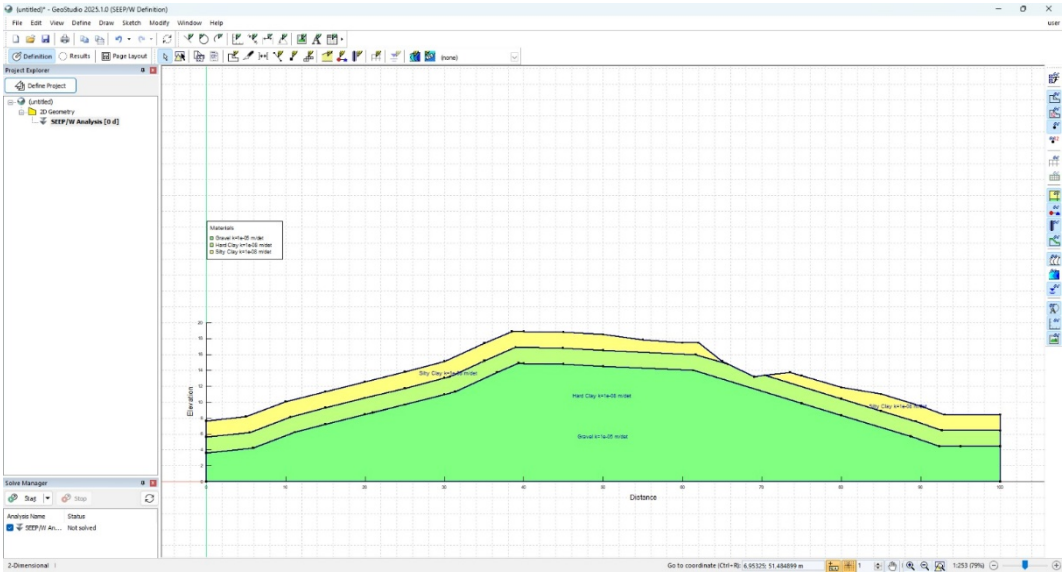
4.3.1. Penyusunan Geometri dan Penampang Bendungan pada *SEEP*/W

Pemodelan rembesan menggunakan perangkat lunak *SEEP*/W diawali dengan penyusunan penampang melintang tubuh bendungan yang merepresentasikan kondisi aktual di lapangan. Penampang tersebut dibuat berdasarkan data geometri bendungan serta gambar teknis perencanaan, sehingga bentuk lereng hulu, puncak bendungan, dan lereng hilir dapat tergambarkan secara akurat. Penyesuaian geometri dilakukan untuk memastikan bahwa model numerik benar-benar mencerminkan kondisi eksisting bendungan yang dianalisis.

Tahap selanjutnya adalah penentuan batas domain analisis, yang berfungsi untuk membatasi area pemodelan rembesan sesuai dengan tujuan kajian. Domain ini mencakup seluruh tubuh bendungan serta sebagian area fondasi yang dinilai berpengaruh terhadap pola aliran rembesan. Penentuan batas domain dilakukan dengan mempertimbangkan jalur aliran air dari sisi hulu ke sisi hilir, sehingga distribusi tekanan air pori dapat dianalisis secara menyeluruh.

Proses pemodelan kemudian dilanjutkan dengan penggambaran geometri tubuh bendungan yang meliputi lereng hulu, puncak, dan lereng hilir, diikuti dengan penetapan elevasi muka air waduk sesuai dengan skenario kondisi yang dianalisis serta pembagian lapisan tanah berdasarkan data *bor log*. Seluruh

tahapan pemodelan dilakukan dengan memperhatikan kesesuaian skala dan dimensi, sehingga hasil analisis yang diperoleh dapat merepresentasikan kondisi aktual dan digunakan sebagai dasar dalam evaluasi stabilitas lereng.



Gambar 4. 1 Gambar Potongan Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur

4.3.2. Pembagian Zona Tanah dan Penetapan Parameter Hidraulik

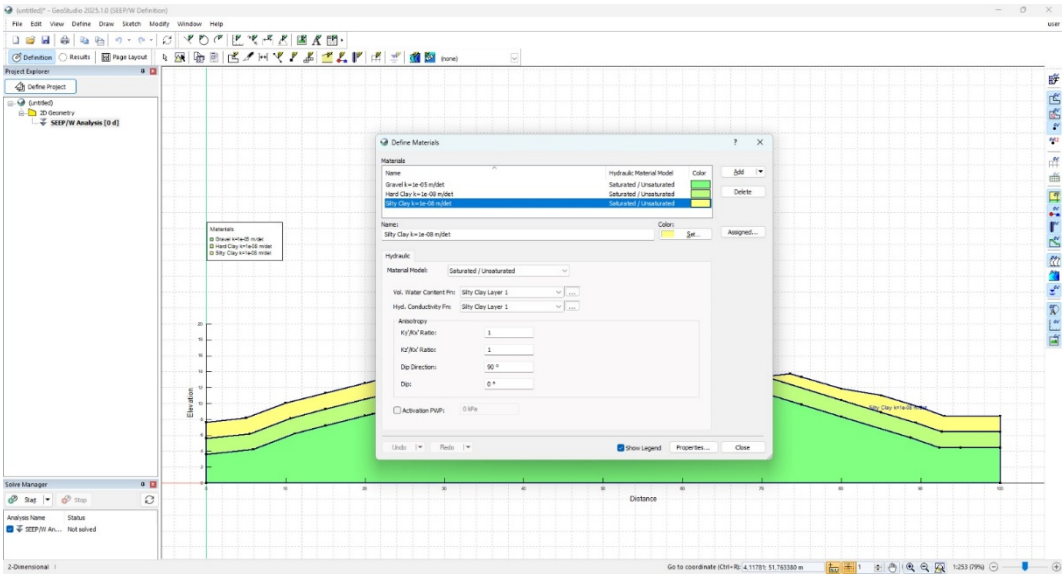
Pembagian zona tanah dalam pemodelan *SEEP*/W dilakukan dengan mengacu pada data *bor log* yang tersedia, sehingga setiap lapisan tanah dalam model dapat merepresentasikan kondisi stratigrafi yang sebenarnya di lapangan. Masing-masing zona tanah didefinisikan berdasarkan jenis material, kedalaman lapisan, serta karakteristik fisik tanah yang menyusun tubuh bendungan dan fondasinya.

Untuk setiap lapisan tersebut, ditetapkan parameter hidraulik utama yang digunakan dalam analisis rembesan. Parameter yang paling berpengaruh adalah koefisien permeabilitas (k), yang menggambarkan kemampuan tanah dalam meloloskan aliran air. Nilai permeabilitas diperoleh dari hasil pengujian laboratorium, data lapangan, maupun referensi teknis yang sesuai dengan jenis tanah yang dianalisis.

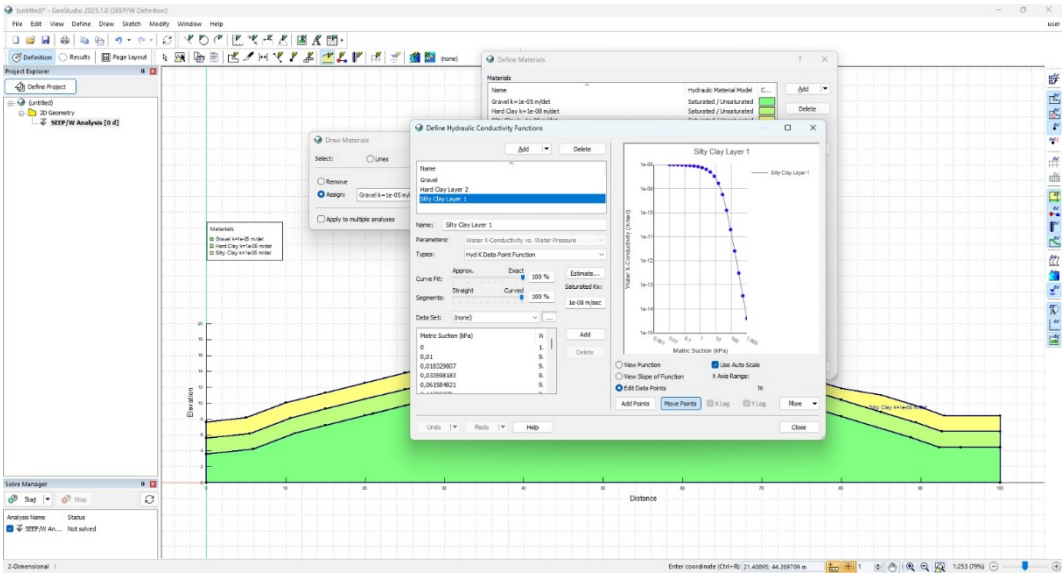
Dalam kondisi tertentu, pemodelan juga dapat mempertimbangkan kurva hubungan antara tekanan air pori dan derajat kejenuhan tanah untuk merepresentasikan perilaku aliran pada kondisi tidak jenuh. Namun, pada

analisis rembesan ini, tanah umumnya diasumsikan berada dalam kondisi jenuh, sehingga penggunaan kurva tersebut bersifat terbatas.

Selain itu, material tanah dalam model diasumsikan bersifat isotropik, yaitu memiliki nilai permeabilitas yang sama ke segala arah. Asumsi ini diterapkan untuk menyederhanakan proses pemodelan, dengan pertimbangan keterbatasan data mengenai anisotropi tanah serta anggapan bahwa pengaruhnya tidak signifikan terhadap pola aliran rembesan yang dianalisis.



Gambar 4. 2 Pembagian Zona Tanah

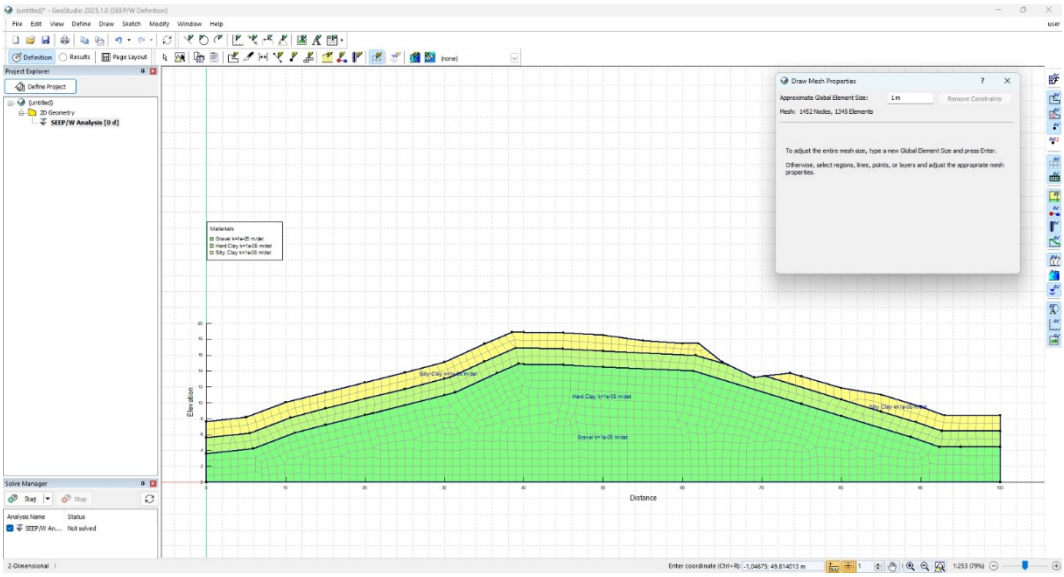


Gambar 4. 3 Parameter Hidraulik

4.3.3. Pembuatan dan Pengaturan Mesh

Pengaturan mesh dalam pemodelan rembesan menggunakan perangkat lunak *SEEP*/W dilakukan dengan menerapkan metode elemen hingga dua dimensi pada seluruh domain tubuh bendungan, dengan ukuran elemen global sekitar 1 meter untuk memperoleh tingkat ketelitian yang memadai. Kepadatan mesh dibuat lebih tinggi pada area lereng hulu serta lapisan tanah bagian atas yang berpotensi mengalami peningkatan tekanan air pori. Sebaliknya, pada zona fondasi dan bagian bawah tubuh bendungan yang relatif kurang kritis digunakan mesh yang lebih kasar untuk meningkatkan efisiensi komputasi.

Distribusi mesh juga disesuaikan dengan pembagian lapisan tanah, sehingga setiap jenis material dapat dimodelkan secara kontinu. Selain itu, mesh yang digunakan telah melalui proses validasi untuk memastikan bahwa variasi ukuran elemen tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap pola aliran rembesan maupun distribusi tekanan air pori. Dengan pendekatan ini, diperoleh keseimbangan antara akurasi hasil analisis dan efisiensi perhitungan numerik.



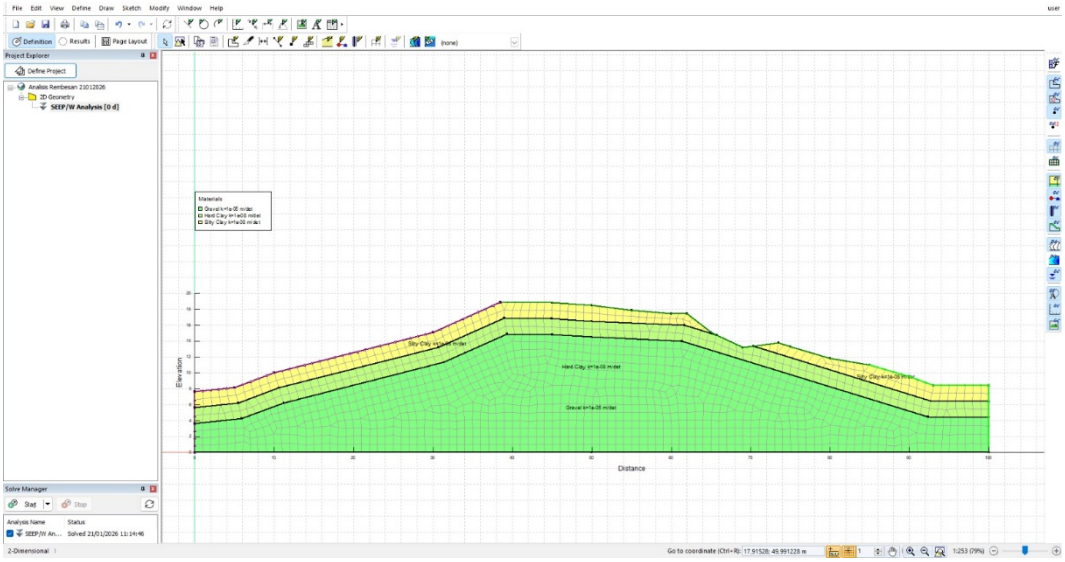
Gambar 4. 4 Pengaturan *Mesh*

4.3.4. Penetapan Kondisi Batas *(Boundary Conditions)*

Penentuan kondisi batas dalam pemodelan rembesan menggunakan *SEEP*/W dilakukan untuk merepresentasikan kondisi hidraulik yang bekerja pada tubuh bendungan. Muka air waduk ditetapkan sebagai *boundary head*

dengan nilai tinggi hidraulik yang disesuaikan pada setiap skenario analisis, sehingga aliran air dari sisi hulu dapat dimodelkan secara realistis.

Pada bagian-bagian tertentu dari batas model, khususnya pada sisi yang tidak memungkinkan terjadinya aliran air, diterapkan kondisi bebas rembesan *(no-flow boundary)* guna membatasi pergerakan air dan menjaga keseimbangan model. Selanjutnya, batas keluar *(exit boundary)* ditetapkan pada sisi hilir bendungan sebagai lokasi keluarnya aliran rembesan, sehingga pola aliran serta distribusi tekanan air pori dari hulu hingga hilir dapat dianalisis secara menyeluruh dan sesuai dengan kondisi lapangan.



Gambar 4. 5 Penetapan *Boundary Conditions*

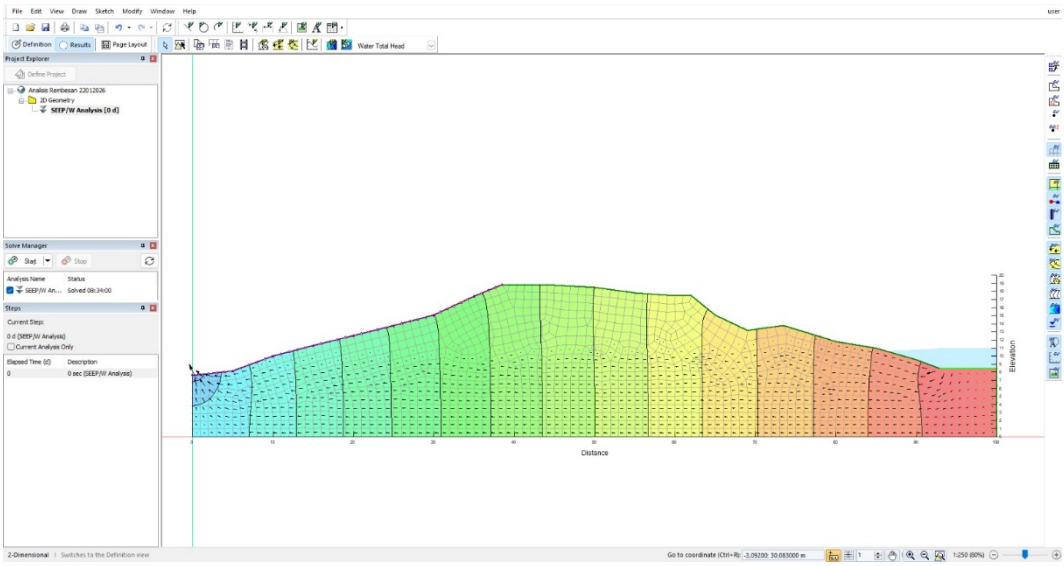
4.3.5. Proses *Running*, Konvergensi Model, dan Hasil Analisis Rembesan

Setelah seluruh tahapan pemodelan rembesan pada *SEEP*/W disusun, analisis dijalankan dengan melakukan proses *running* model menggunakan parameter serta kondisi batas yang telah ditetapkan. Pada tahap ini, perangkat lunak menyelesaikan persamaan aliran air dalam media berpori secara numerik dengan metode elemen hingga. Proses perhitungan dilanjutkan hingga diperoleh solusi yang stabil, yang ditunjukkan oleh terpenuhinya kriteria konvergensi serta tidak adanya peringatan kesalahan *(error)* pada hasil analisis.

Kesesuaian solusi selanjutnya diperiksa melalui evaluasi distribusi tekanan air pori dan pola aliran rembesan untuk memastikan bahwa hasil yang diperoleh bersifat logis dan konsisten dengan kondisi hidraulik yang

dimodelkan. Selain itu, konvergensi dianalisis dengan memastikan bahwa perubahan hasil antar iterasi berada dalam batas toleransi yang diperkenankan, sehingga hasil analisis dinilai representatif dan layak digunakan untuk tahap kajian berikutnya.

Output analisis rembesan dari *SEEP*/W meliputi pola aliran rembesan *(flow net)*, distribusi tekanan air pori, serta identifikasi zona jenuh dan tidak jenuh pada tubuh bendungan. Pola aliran rembesan menggambarkan arah pergerakan air dari sisi hulu ke sisi hilir, sedangkan distribusi tekanan air pori disajikan dalam bentuk kontur yang menunjukkan variasi tekanan pada setiap titik dalam domain analisis. Selain itu, diperoleh garis-garis aliran yang memperlihatkan jalur rembesan air dalam media berpori beserta nilai tekanan air pori pada bidang-bidang kritis, yang selanjutnya digunakan sebagai data masukan dalam analisis stabilitas lereng menggunakan perangkat lunak *SLOPE*/W.



Gambar 4. 6 Hasil Pemodelan Analisis Rembesan menggunakan GeoStudio *SEEP*/W

Hasil pemodelan menunjukkan pola aliran rembesan dari sisi hulu menuju hilir dengan distribusi gradien hidrolik yang relatif merata dan tanpa indikasi jalur aliran terkonsentrasi yang berpotensi memicu kegagalan internal.

Secara kuantitatif, hasil perhitungan menunjukkan bahwa total debit rembesan yang melewati tubuh bendungan adalah sebesar $1{,}8698577 \times 10^{-8}$

m³/det. Nilai ini menggambarkan besarnya aliran air yang keluar akibat proses rembesan pada kondisi hidrolik yang dianalisis.

Untuk menilai tingkat keamanannya, debit rembesan tersebut dibandingkan dengan kriteria batas maksimum rembesan, yaitu ≤ 0,1% dari kapasitas tampungan total waduk. Dengan kapasitas tampungan aktual waduk sebesar:

$$V = 2{,}45 \times 10^9 \text{ m}^3$$

maka batas maksimum kehilangan air yang diizinkan akibat rembesan adalah:

$$V_{\text{izin}} = 0{,}001 \times V = 2{,}45 \times 10^6 \text{ m}^3$$

Jika dinyatakan dalam satuan debit, maka:

$$Q_{\text{izin}} = \frac{2{,}45 \times 10^6}{86.400} = 28{,}36 \text{ m}^3/\text{det}$$

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa debit rembesan hasil pemodelan (1,8698577 × 10^{-8} m³/det) berada jauh di bawah batas debit rembesan yang diizinkan (28,36 m³/det).

Apabila ditinjau dari kontribusi kehilangan volume tampungan per hari, maka debit rembesan setara dengan:

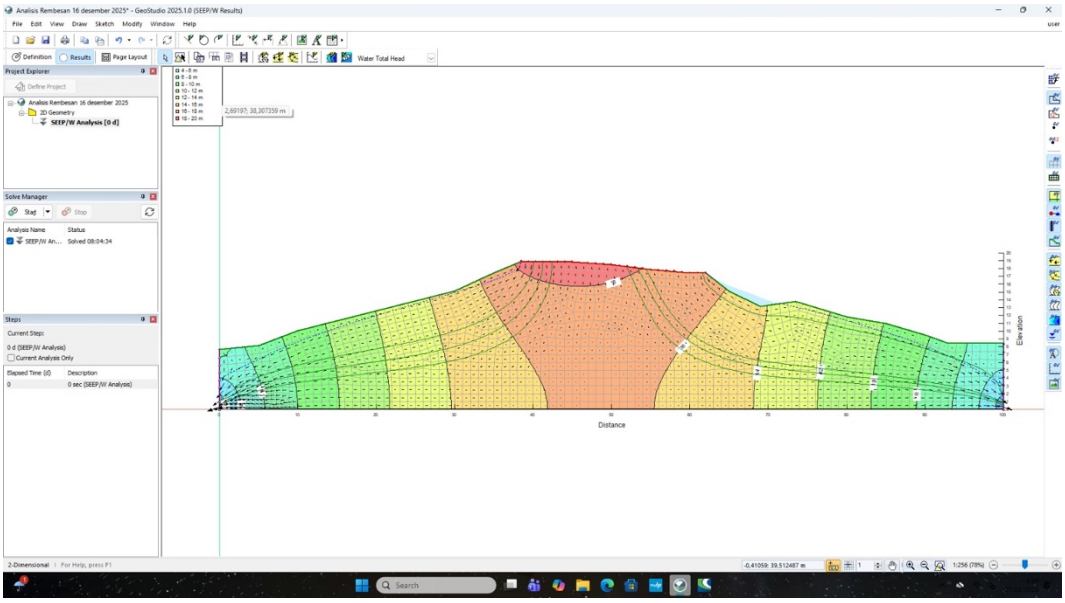
$$Q_{\text{harian}} = 1{,}8698577 \times 10^{-8} \times 86.400 = 1{,}615 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{hari}$$

Persentase kehilangan tampungan akibat rembesan terhadap total kapasitas waduk adalah:

$$\text{Persentase rembesan} = \frac{1{,}615 \times 10^{-3}}{2{,}45 \times 10^9} \times 100\% \approx 6{,}6 \times 10^{-11}\%$$

Nilai tersebut sangat jauh di bawah ambang batas 0,1%, sehingga kehilangan air akibat rembesan dapat dikategorikan sangat tidak signifikan baik secara operasional maupun dari sudut pandang keamanan bendungan.

4.3.6. Hasil Analisis Rembesan pada Kondisi Hujan



Gambar 4. 7 Pola Aliran Rembesan Pada Lereng Bendungan Pada Kondisi Hujan (*SEEP*/W)

Berdasarkan hasil pemodelan hidraulik menggunakan *SEEP*/W pada kondisi hujan, pola aliran menunjukkan bahwa air hujan yang masuk ke tubuh lereng sebagian besar tertahan pada lapisan tanah bagian atas. Distribusi kontur *total head* dan garis aliran rembesan memperlihatkan bahwa laju rembesan yang berkembang relatif kecil dan tidak menunjukkan peningkatan signifikan aliran rembesan menuju bagian dalam tubuh bendungan. Hal ini mengindikasikan bahwa kapasitas infiltrasi vertikal air hujan dibatasi oleh keberadaan lapisan tanah berpermeabilitas rendah, khususnya lapisan lempung *(clay)* di bagian atas lereng, yang berfungsi sebagai lapisan penghambat aliran.

Kondisi tersebut menyebabkan air hujan cenderung terakumulasi pada lapisan atas lereng, sehingga meningkatkan tingkat kejenuhan tanah secara lokal, namun tidak secara langsung meningkatkan debit rembesan internal dalam jumlah besar. Dengan demikian, hasil pemodelan menunjukkan bahwa kontribusi hujan terhadap peningkatan rembesan internal relatif kecil, dan masih berada dalam batas yang tidak membahayakan dari sisi keamanan rembesan.

Meskipun demikian, peningkatan kejenuhan tanah pada lapisan atas akibat hujan berpotensi menurunkan parameter kuat geser efektif tanah, khususnya

kohesi efektif dan sudut geser dalam, melalui peningkatan tekanan air pori dan berkurangnya tegangan efektif. Oleh karena itu, secara konseptual dapat disimpulkan bahwa peran utama hujan terhadap kestabilan lereng lebih dominan melalui mekanisme kejenuhan tanah dan degradasi parameter mekanik tanah, bukan melalui peningkatan rembesan internal yang signifikan.

Hasil ini mendukung kesimpulan bahwa kerentanan lereng terhadap longsor pada kondisi hujan ekstrem lebih berkaitan dengan kondisi tanah jenuh dan penurunan kekuatan tanah, dibandingkan dengan kegagalan yang dipicu oleh aliran rembesan besar di dalam tubuh bendungan. Temuan ini sekaligus menegaskan bahwa analisis hidraulik dan stabilitas lereng perlu dipertimbangkan secara terpadu dalam mengevaluasi pengaruh hujan terhadap keselamatan lereng bendungan.

4.4. Analisis Stabilitas Lereng Menggunakan *SLOPE*/W

Subbab ini membahas analisis stabilitas lereng Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur yang dilakukan menggunakan perangkat lunak *SLOPE*/W. Analisis stabilitas lereng bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan lereng bendungan dalam menahan gaya-gaya yang bekerja dan untuk menentukan tingkat keamanan lereng terhadap potensi kelongsoran. Pemodelan dilakukan berdasarkan kondisi geometri bendungan, parameter kuat geser tanah, serta kondisi muka air yang ditetapkan sesuai dengan skenario analisis. Pendekatan yang digunakan dalam *SLOPE*/W didasarkan pada prinsip keseimbangan batas, di mana kestabilan lereng dinyatakan dalam bentuk *factor of safety* (FS) sebagai perbandingan antara gaya penahan dan gaya penggerak pada bidang gelincir potensial. Melalui analisis ini, dapat diidentifikasi kondisi lereng yang aman, kondisi kritis, serta potensi terjadinya ketidakstabilan lereng pada berbagai kondisi operasional bendungan, sehingga hasil analisis dapat digunakan sebagai dasar evaluasi keselamatan Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur.

4.4.1. Tujuan dan Konsep Dasar Analisis Stabilitas Lereng Menggunakan *SLOPE*/W

Analisis kestabilan lereng dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak *SLOPE*/W untuk mengevaluasi tingkat keamanan lereng hulu Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur terhadap potensi terjadinya

kelongsoran. Melalui analisis tersebut, nilai *factor of safety* (FS) dihitung pada berbagai kondisi hidraulik yang ditetapkan dalam skenario analisis, sehingga tingkat kemampuan lereng dalam menahan gaya-gaya yang bekerja dapat diketahui.

Analisis stabilitas lereng pada *SLOPE*/W didasarkan pada prinsip keseimbangan gaya, di mana kestabilan lereng dievaluasi terhadap kemungkinan pergerakan massa tanah sepanjang bidang gelincir potensial. Dalam pemodelan ini, bidang gelincir diasumsikan berbentuk melengkung *(circular slip surface)*, yang umum diterapkan pada analisis lereng bendungan urugan. Metode perhitungan yang digunakan termasuk dalam pendekatan keseimbangan batas (*limit equilibrium*), dengan faktor keamanan didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya penahan yang berasal dari kekuatan geser tanah dan gaya penggerak yang disebabkan oleh berat sendiri tanah serta pengaruh kondisi hidraulik. Pendekatan ini memungkinkan penilaian kestabilan lereng dilakukan secara sistematis dan kuantitatif sesuai dengan prinsip-prinsip analisis geoteknik.

4.4.2. Penyusunan Geometri Lereng dan Model Analisis

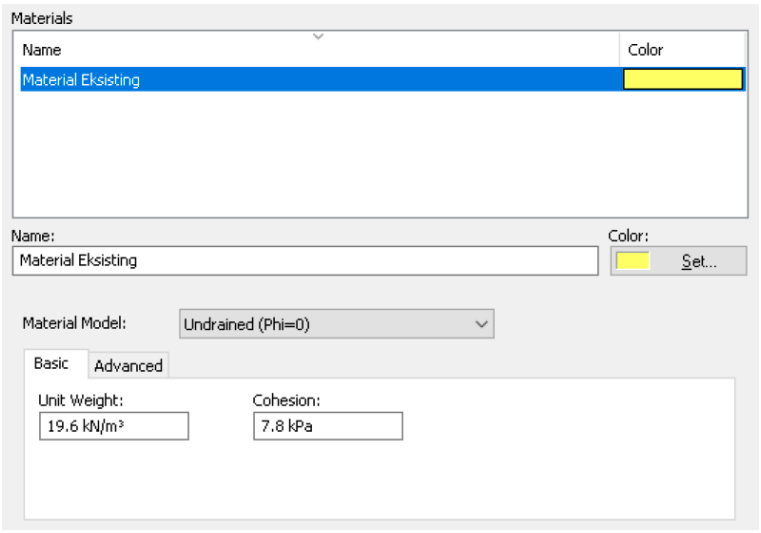
Penyusunan geometri lereng dalam analisis stabilitas menggunakan perangkat lunak *SLOPE*/W dilakukan dengan mengacu pada geometri lereng yang sama seperti pada model *SEEP*/W seperti **Gambar 4.1**, sehingga konsistensi bentuk dan dimensi lereng tetap terjaga. Geometri tersebut disesuaikan dengan kondisi eksisting bendungan berdasarkan gambar teknis dan hasil observasi lapangan, khususnya pada lereng hulu yang menjadi fokus utama analisis.

Tahap berikutnya adalah penentuan batas domain analisis stabilitas yang mencakup seluruh area lereng yang berpotensi mengalami kelongsoran. Pemodelan dilakukan dengan mengimpor atau menggambar ulang penampang lereng ke dalam *SLOPE*/W, kemudian dilakukan verifikasi untuk memastikan kesesuaian dimensi dan elevasi lereng dengan kondisi aktual. Langkah ini bertujuan agar model stabilitas yang dibangun mampu merepresentasikan kondisi lereng secara akurat dan menghasilkan nilai faktor keamanan yang dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

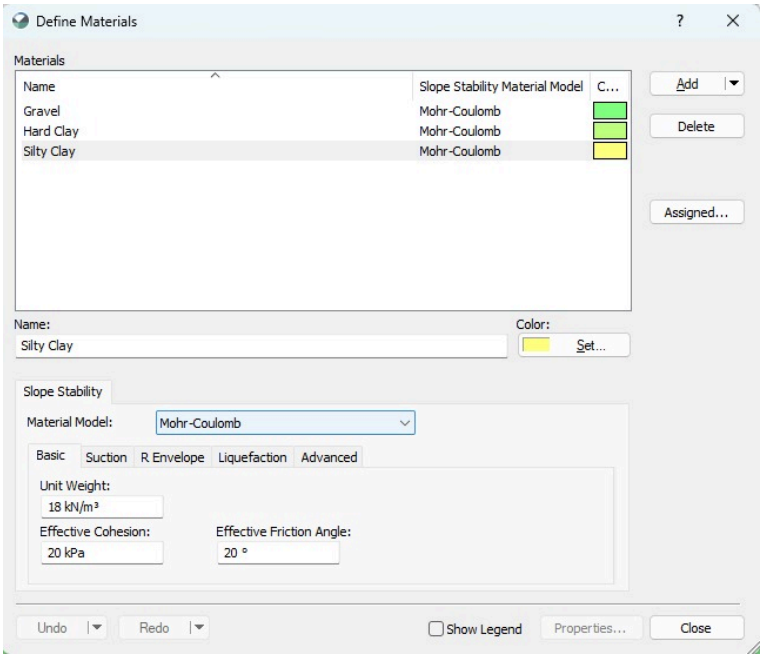
4.4.3. Penetapan Parameter Kuat Geser Tanah

Penentuan parameter kuat geser tanah dalam analisis stabilitas lereng menggunakan perangkat lunak *SLOPE*/W dilakukan dengan menetapkan nilai kohesi efektif (c') dan sudut geser dalam efektif (φ') untuk setiap lapisan tanah penyusun tubuh bendungan. Nilai-nilai parameter tersebut diperoleh dari hasil pengujian laboratorium serta data teknis yang tersedia, sehingga dapat merepresentasikan karakteristik mekanik tanah secara memadai.

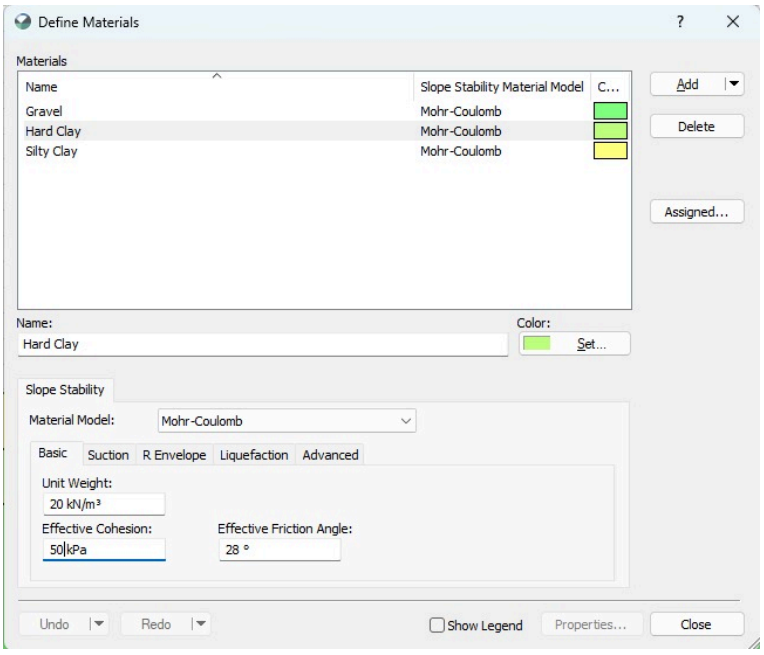
Parameter kuat geser tanah dibedakan sesuai dengan pembagian lapisan tanah pada penampang lereng untuk memperhitungkan variasi sifat tanah secara vertikal. Dalam analisis ini, tanah diasumsikan berada pada kondisi terdrainase *(drained condition)*, sehingga nilai c' dan φ' digunakan sebagai parameter utama dalam perhitungan kestabilan lereng. Pendekatan ini sesuai untuk analisis kestabilan lereng jangka panjang pada bendungan urugan dan memungkinkan evaluasi faktor keamanan yang konsisten secara geoteknik.



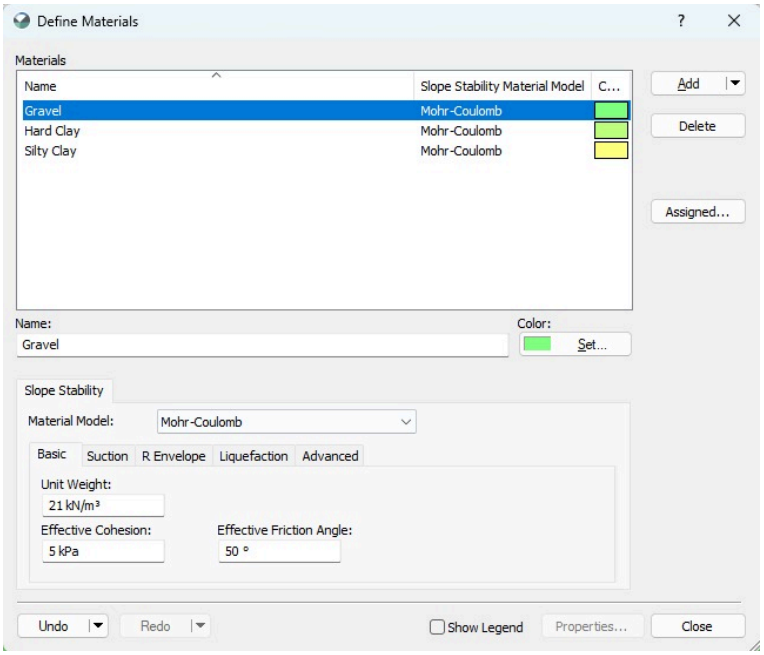
Gambar 4. 8 Parameter Material Eksisting



Gambar 4. 9 Parameter *Silty Clay* dari Pengujian Laboratorium



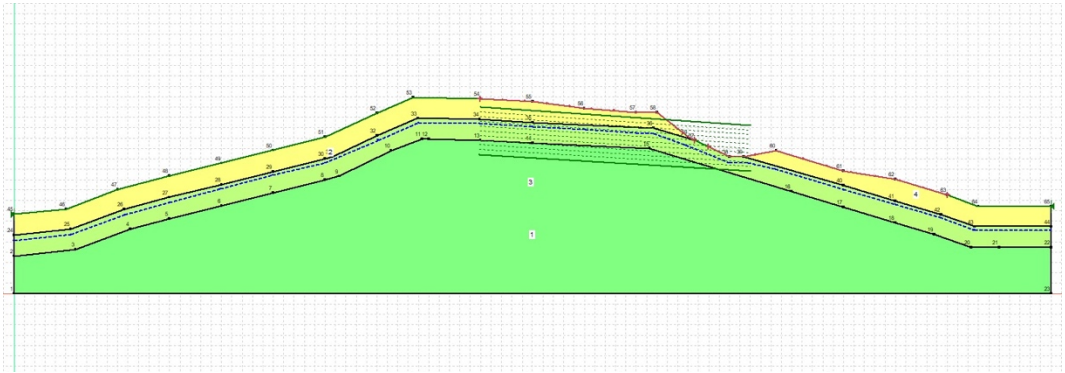
Gambar 4. 10 Parameter *Hard Clay* dari Pengujian Laboratorium



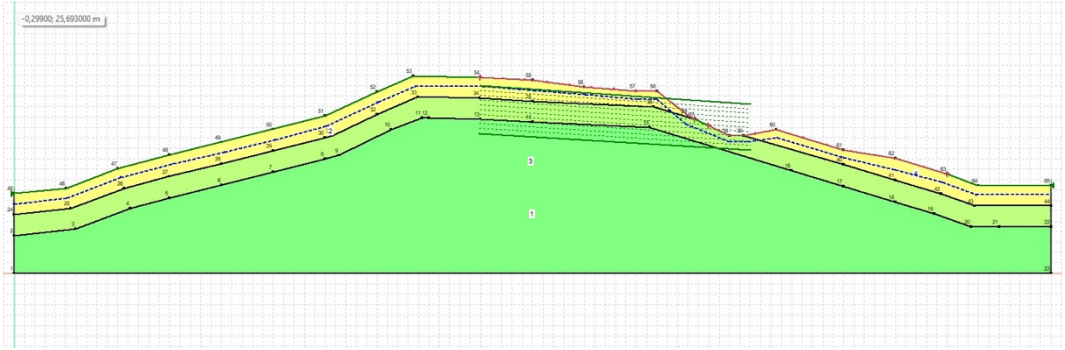
Gambar 4. 11 Parameter *Gravel* dari Pengujian Laboratorium

4.4.4. Penetapan Kondisi Hidraulik dan Tekanan Air Pori

Kondisi muka air disesuaikan untuk setiap skenario analisis yang ditinjau, meliputi kondisi lereng eksisting, kondisi kering, kondisi muka air normal, serta kondisi muka air tinggi akibat hujan ekstrem. Penyesuaian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi kondisi hidraulik terhadap perubahan tekanan air pori dan tingkat kestabilan lereng. Melalui pendekatan ini, perbedaan nilai faktor keamanan pada masing-masing skenario dapat dianalisis, sekaligus diidentifikasi kondisi yang paling kritis terhadap potensi terjadinya kelongsoran.



Gambar 4. 12 Kondisi Muka Air Tanah Normal



Gambar 4. 13 Muka Air Tanah Tinggi

4.4.5. Penentuan Metode Analisis dan Bidang Gelincir

Analisis kestabilan lereng dalam penelitian ini dilakukan dengan menerapkan metode Bishop Simplified, yang dipilih karena sesuai untuk analisis lereng pada bendungan urugan dengan asumsi bidang gelincir berbentuk melengkung. Metode ini termasuk dalam pendekatan keseimbangan batas *(limit equilibrium)* dan telah banyak digunakan dalam kajian stabilitas lereng karena mampu memberikan hasil yang andal dengan efisiensi komputasi yang baik.

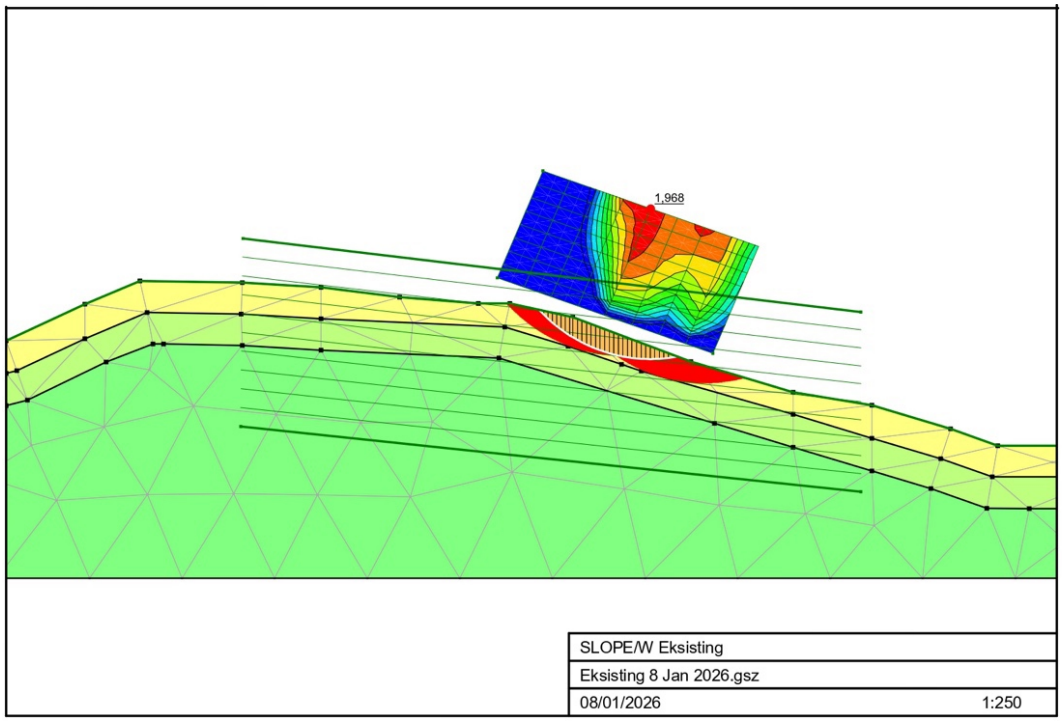
Penentuan bidang gelincir potensial dilakukan dengan menetapkan area pencarian *(search area)* yang mencakup seluruh zona lereng yang berpotensi mengalami kelongsoran. Di dalam area tersebut, perangkat lunak *SLOPE*/W secara otomatis menghasilkan berbagai alternatif bidang gelincir dengan variasi posisi dan radius, sehingga dapat diidentifikasi bidang gelincir kritis yang menghasilkan nilai faktor keamanan terendah. Pengaturan jumlah serta sebaran bidang gelincir dilakukan untuk memastikan bahwa kemungkinan bidang gelincir yang relevan telah terwakili secara memadai dalam analisis.

Setelah seluruh parameter dan pengaturan analisis ditetapkan, proses running model dilakukan untuk menghitung nilai faktor keamanan lereng. Kesesuaian hasil perhitungan kemudian dievaluasi dengan memastikan bahwa solusi yang diperoleh bersifat logis dan konsisten dengan geometri lereng serta parameter tanah yang digunakan.

4.4.6. Hasil Analisis Stabilitas Lereng Menggunakan *SLOPE*/W

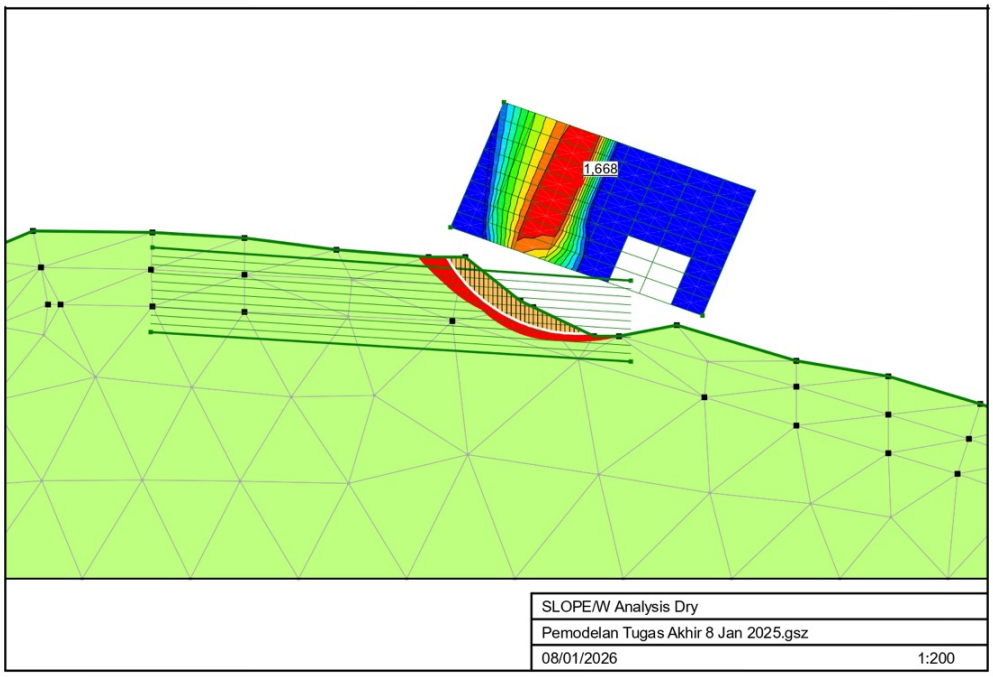
Hasil analisis stabilitas lereng menggunakan perangkat lunak *SLOPE*/W menunjukkan adanya variasi nilai *factor of safety* (FS) pada setiap skenario kondisi hidraulik yang dianalisis. Penilaian kestabilan lereng dalam penelitian

ini mengacu pada kriteria faktor keamanan FS ≥ 1,5 sebagai batas minimum tingkat keamanan lereng. Nilai faktor keamanan yang digunakan diperoleh dari bidang gelincir kritis yang menghasilkan nilai FS terendah, dan dijadikan sebagai indikator tingkat kestabilan relatif lereng hulu Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur.



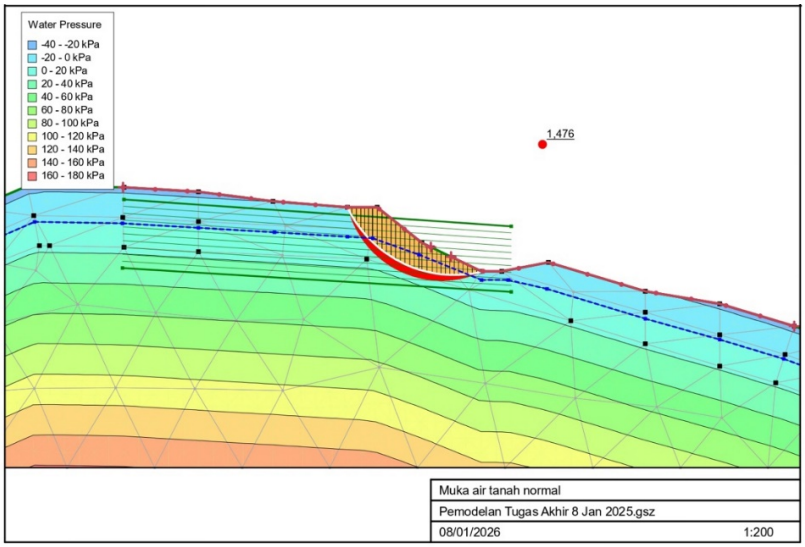
Gambar 4. 14 Pemodelan Kondisi Eksisting Sebelum Longsor

Pada kondisi eksisting seperti **Gambar 4.7**, diperoleh nilai faktor keamanan sebesar FS = 1,968, yang berada di atas kriteria keamanan yang ditetapkan. Nilai tersebut menunjukkan bahwa, berdasarkan asumsi dan parameter yang digunakan dalam pemodelan, gaya penahan lereng masih lebih besar dibandingkan gaya penggerak yang bekerja, sehingga lereng berada pada kondisi yang relatif stabil pada kondisi operasional saat ini.



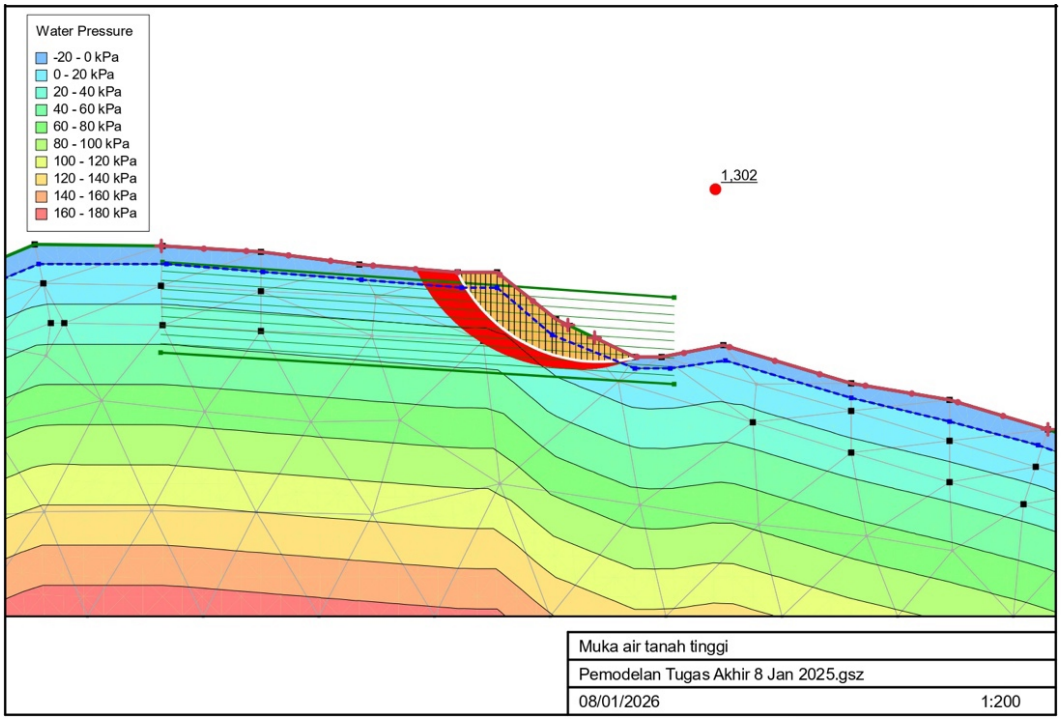
Gambar 4. 15 Pemodelan Kondisi Setelah Longsor Tanpa Dipengaruhi Tekanan Air Pori

Pada kondisi kering, nilai faktor keamanan menurun menjadi FS = 1,668, namun masih memenuhi kriteria keamanan. Meskipun demikian, nilai FS pada kondisi ini lebih rendah dibandingkan kondisi eksisting, yang mengindikasikan bahwa perubahan distribusi berat serta kondisi hidraulik memengaruhi keseimbangan gaya pada lereng, meskipun tanpa pengaruh tekanan air pori yang signifikan.



Gambar 4. 16 Pemodelan Kondisi Setelah Longsor yang Dipengaruhi Tekanan Air Pori Normal

Pada kondisi muka air normal, nilai faktor keamanan kembali menurun menjadi FS = 1,476, yang berada sedikit di bawah kriteria keamanan FS = 1,5. Nilai ini menunjukkan bahwa kestabilan lereng berada pada kondisi mendekati kritis. Penurunan faktor keamanan tersebut secara mekanistik berkaitan dengan meningkatnya tekanan air pori yang menyebabkan berkurangnya tegangan efektif tanah, sehingga kemampuan lereng dalam menahan gaya geser ikut menurun.



Gambar 4. 17 Pemodelan Kondisi Setelah Longsor yang Dipengaruhi Tekanan Air Pori Tinggi

Kondisi paling kritis diperoleh pada kondisi muka air tinggi akibat hujan ekstrem, dengan nilai faktor keamanan sebesar FS = 1,302. Nilai ini menunjukkan bahwa lereng tidak lagi memenuhi kriteria keamanan yang dipersyaratkan dan memiliki tingkat kerentanan yang lebih tinggi terhadap potensi terjadinya kelongsoran. Kenaikan muka air menyebabkan peningkatan tekanan air pori serta bertambahnya berat massa tanah dalam kondisi jenuh, yang secara langsung meningkatkan gaya penggerak dan menurunkan tingkat kestabilan lereng.

Perlu ditegaskan bahwa hasil analisis ini tidak secara langsung menyimpulkan terjadinya longsor, melainkan menggambarkan tingkat

kerentanan lereng berdasarkan skenario kondisi hidraulik yang dianalisis. Nilai faktor keamanan yang diperoleh tetap dipengaruhi oleh asumsi pemodelan, keterbatasan data parameter tanah, serta pendekatan metode keseimbangan batas yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 4. 3 Hasil Analisis *Factor of Safety* (FS) Bendungan Pelana dalam berbagai kondisi

No	Kondisi Analisis	Nilai FS	Kriteria FS ≥ 1,5	Interpretasi Stabilitas
1	Kondisi Lereng Eksisting	1,968	Memnuhi	Lereng relatif stabil
2	Kondisi kering	1,668	Memenuhi	Lereng stabil
3	Kondisi muka air normal	1,476	Tidak Memenuhi	Lereng mendekati kondisi kritis
4	Kondisi muka air tinggi (hujan ekstrem)	1,302	Tidak Memenuhi	Lereng paling kritis dan rentan

Hasil analisis stabilitas lereng menunjukkan bahwa kondisi muka air tinggi akibat hujan ekstrem merupakan skenario paling kritis, yang ditandai dengan nilai faktor keamanan terendah. Kondisi ini secara konseptual sejalan dengan peristiwa longsor yang terjadi pada 24 Februari 2021, yang didahului oleh curah hujan dengan intensitas tinggi serta peningkatan kejenuhan tanah. Meskipun analisis ini tidak dimaksudkan untuk merekonstruksi kejadian longsor secara langsung, hasil perhitungan faktor keamanan memberikan indikasi bahwa kondisi hidraulik ekstrem dapat menurunkan kestabilan lereng hingga mencapai tingkat kerentanan yang tinggi. Dalam kondisi tersebut, lereng berpotensi mengalami kelongsoran apabila dipicu oleh faktor-faktor tambahan yang berkembang di lapangan.

Secara keseluruhan, analisis stabilitas lereng menggunakan perangkat lunak *SLOPE*/W menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan lereng hulu Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur berada pada kisaran 1,302 hingga 1,968, bergantung pada kondisi hidraulik yang dianalisis. Berdasarkan kriteria FS ≥ 1,5, kondisi eksisting dan kondisi kering masih memenuhi persyaratan stabilitas, sementara kondisi muka air normal serta kondisi muka air tinggi akibat hujan ekstrem berada pada kondisi mendekati kritis hingga kritis. Penurunan nilai faktor keamanan tersebut secara mekanistik dipengaruhi oleh meningkatnya tekanan air pori dan tingkat kejenuhan tanah. Temuan ini menegaskan bahwa kondisi hidraulik ekstrem berperan penting dalam

meningkatkan kerentanan lereng dan secara konseptual berkaitan dengan kejadian longsor yang terjadi pada 24 Februari 2021.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan serta mengacu pada rumusan masalah penelitian, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakteristik Geoteknik dan Geometri Bendungan

   Tubuh Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur tersusun atas beberapa lapisan tanah yang memiliki parameter kuat geser berbeda, meliputi kohesi efektif (c'), sudut geser dalam efektif (φ'), berat isi tanah, serta koefisien permeabilitas. Dari sisi geometri, lereng hulu memiliki kemiringan yang relatif curam dan menjadi bagian yang paling rentan terhadap potensi ketidakstabilan. Kombinasi antara karakteristik tanah berbutir halus terutama lapisan lempung dengan permeabilitas rendah dan konfigurasi lereng yang curam memberikan pengaruh signifikan terhadap respons stabilitas, khususnya ketika terjadi perubahan kondisi hidraulik.

2. Pengaruh Tekanan Air Pori dan Pola Rembesan

   Analisis rembesan menggunakan *SEEP*/W menunjukkan bahwa aliran rembesan pada tubuh bendungan masih dalam kondisi terkendali, dengan debit yang sangat kecil dan berada di bawah batas kriteria keamanan ≤ 0,1% dari kapasitas tampungan. Namun demikian, kenaikan muka air waduk dan peningkatan curah hujan terbukti meningkatkan tekanan air pori serta tingkat kejenuhan tanah. Secara mekanistik, kondisi ini menyebabkan penurunan tegangan efektif tanah, sehingga faktor hidraulik terutama kenaikan muka air dan hujan ekstrem berkontribusi terhadap penurunan stabilitas lereng.

3. Evaluasi Nilai *factor of safety* (FS)

   Hasil analisis stabilitas lereng menggunakan *SLOPE*/W menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan (FS) lereng hulu berada pada rentang 1,302 hingga 1,968, tergantung pada kondisi hidraulik yang dianalisis. Mengacu pada kriteria nasional FS ≥ 1,5, kondisi eksisting (FS = 1,968) dan kondisi kering (FS = 1,668) masih memenuhi persyaratan stabilitas. Sebaliknya, pada kondisi

muka air normal (FS = 1,476) dan terutama pada kondisi muka air tinggi akibat hujan ekstrem (FS = 1,302), nilai FS berada di bawah batas yang dipersyaratkan, sehingga dikategorikan sebagai kondisi mendekati kritis hingga kritis. Hal ini mengindikasikan meningkatnya tingkat kerentanan lereng pada kondisi hidraulik ekstrem.

4. Rekomendasi Teknis Mitigasi Risiko

   Berdasarkan hasil evaluasi geoteknik dan hidraulik, beberapa langkah teknis yang direkomendasikan antara lain optimalisasi sistem drainase untuk mengurangi tekanan air pori, pengendalian muka air waduk pada kondisi ekstrem, serta pertimbangan perkuatan lereng atau penyesuaian geometri apabila diperlukan. Selain itu, pemantauan tekanan air pori dan deformasi lereng secara berkala menjadi langkah preventif yang penting dalam menjaga keselamatan bendungan.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa meskipun kondisi rembesan masih tergolong aman, faktor hidraulik ekstrem memiliki peran signifikan dalam menurunkan stabilitas lereng dan meningkatkan tingkat kerentanan. Oleh karena itu, diperlukan pengelolaan dan pengendalian yang berkelanjutan untuk memastikan keselamatan bendungan tetap terjaga.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan yang ada, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Optimalisasi sistem drainase, baik drainase internal maupun drainase permukaan lereng, perlu dilakukan untuk membantu menurunkan tekanan air pori, terutama pada saat muka air waduk tinggi maupun ketika terjadi hujan ekstrem.
2. Pihak pengelola bendungan disarankan untuk mengendalikan elevasi muka air waduk secara lebih hati-hati pada kondisi hidrometeorologi ekstrem, sehingga risiko penurunan stabilitas lereng dapat diminimalkan.
3. Pemantauan rutin terhadap tekanan air pori, elevasi muka air, serta deformasi lereng perlu dilaksanakan melalui sistem instrumentasi yang memadai. Langkah ini penting untuk mendeteksi gejala ketidakstabilan sejak dini dan memungkinkan tindakan preventif segera dilakukan.

4. Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan analisis rembesan secara transien, penggunaan metode numerik yang lebih lanjut seperti metode elemen hingga, serta validasi model dengan memanfaatkan data monitoring lapangan. Pendekatan tersebut diharapkan dapat menghasilkan analisis yang lebih komprehensif dan lebih merepresentasikan kondisi aktual bendungan.

Melalui evaluasi yang berkelanjutan serta penerapan rekomendasi teknis secara tepat, diharapkan tingkat keselamatan Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur dapat terus dipertahankan secara optimal.

.

DAFTAR PUSTAKA

Ariyanto, H., & Wijayanto, A. (2022). Analisis pengaruh variasi parameter tanah terhadap kestabilan bendungan urugan menggunakan Plaxis 2D. Jurnal Teknik Sipil, 29(2), 145–154.

Bowles, J. E. (1997). *Foundation analysis and design* (5th ed.). New York: McGraw-Hill.

Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill.

Costa, J. E., & Schuster, R. L. (1988). *The formation and failure of natural dams. Geological Society of America Bulletin*, 100(7), 1054–1068.

Das, B. M. (2011). *Principles of geotechnical engineering* (7th ed.). Stamford: Cengage Learning.

Das, B. M., & Sobhan, K. (2010). *Principles of geotechnical engineering* (7th ed.). Stamford: Cengage Learning.

Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (1990). *Soil strength and slope stability*. New York: Wiley.

Ekasari, D., Nugroho, R., & Wibowo, A. (2022). Analisis stabilitas tubuh Bendungan Banyu Urip menggunakan GeoStudio 2018. Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sipil, 14(3), 211–220.

Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., & Bell, G. (2015). *Geotechnical engineering of dams* (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.

Fitria, N., & Saputra, R. (2021). Efektivitas filter dan sistem drainase pada bendungan urugan. Jurnal Infrastruktur dan Lingkungan Binaan, 7(1), 67–74.

Frinandy, B., & Ismadi, S. (2023). Evaluasi kondisi tubuh Bendungan Sadawarna berdasarkan monitoring geoteknik. Jurnal Teknik Hidraulik, 15(4), 329–338.

Hardiyatmo, H. C. (2012). Stabilitas lereng. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

Huda, M., Rahayu, S., & Permana, A. (2019). Evaluasi rembesan dan tekanan air pori pada Bendungan Panohan dengan SEEP/W. Jurnal Geoteknik Indonesia, 6(2), 99–108.

Nisa, L., Prasetyo, B., & Utami, D. (2023). Analisis stabilitas dan rehabilitasi Bendung Margopadang dengan Plaxis V20. Jurnal Konstruksi dan Material, 12(2), 221–230.

Ohio Environmental Protection Agency. (2005). *Dam safety engineering program: Technical guidelines*. Ohio EPA.

Okeke, C. A., & Wang, G. (2016). *Seepage-induced failure mechanisms of earth dams. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(7), 1–10.

Rahardjo, H., Ong, T. H., Rezaur, R. B., & Leong, E. C. (2007). *Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall infiltration. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(12), 1532–1543.

Rahayu, S., & Permana, A. (2021). Analisis stabilitas lereng Bendungan Cipanas akibat fluktuasi muka air. Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain, 9(2), 177–185.

Ramdani, F., & Gunawan, T. (2022). Analisis pengaruh beban gempa terhadap stabilitas bendungan urugan dengan metode pseudo-static. Jurnal Teknik Sipil Indonesia, 28(1), 59–70.

SNI 8460:2017. (2017). Geoteknik – Tata cara perencanaan teknik stabilitas lereng. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional (BSN).

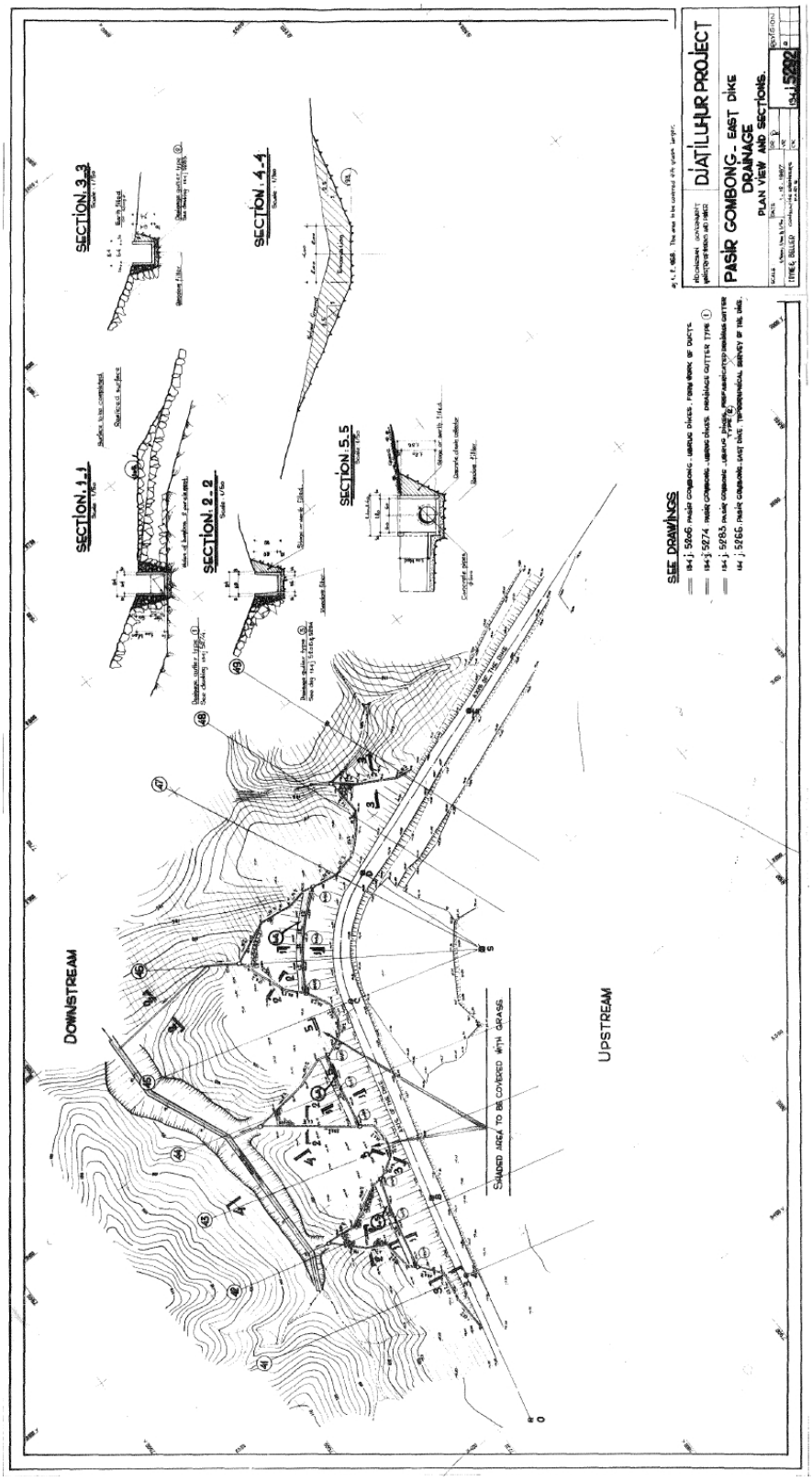
Terzaghi, K. (1925). *Principles of soil mechanics: IV—Settlement and consolidation of clay*. Engineering News-Record, 95, 874–878.

Zain, R., Fauzi, A., & Handoko, R. (2023). Pengaruh urutan penimbunan terhadap stabilitas bendungan urugan. Jurnal Mekanika Tanah dan Rekayasa Pondasi, 11(3), 201–210.

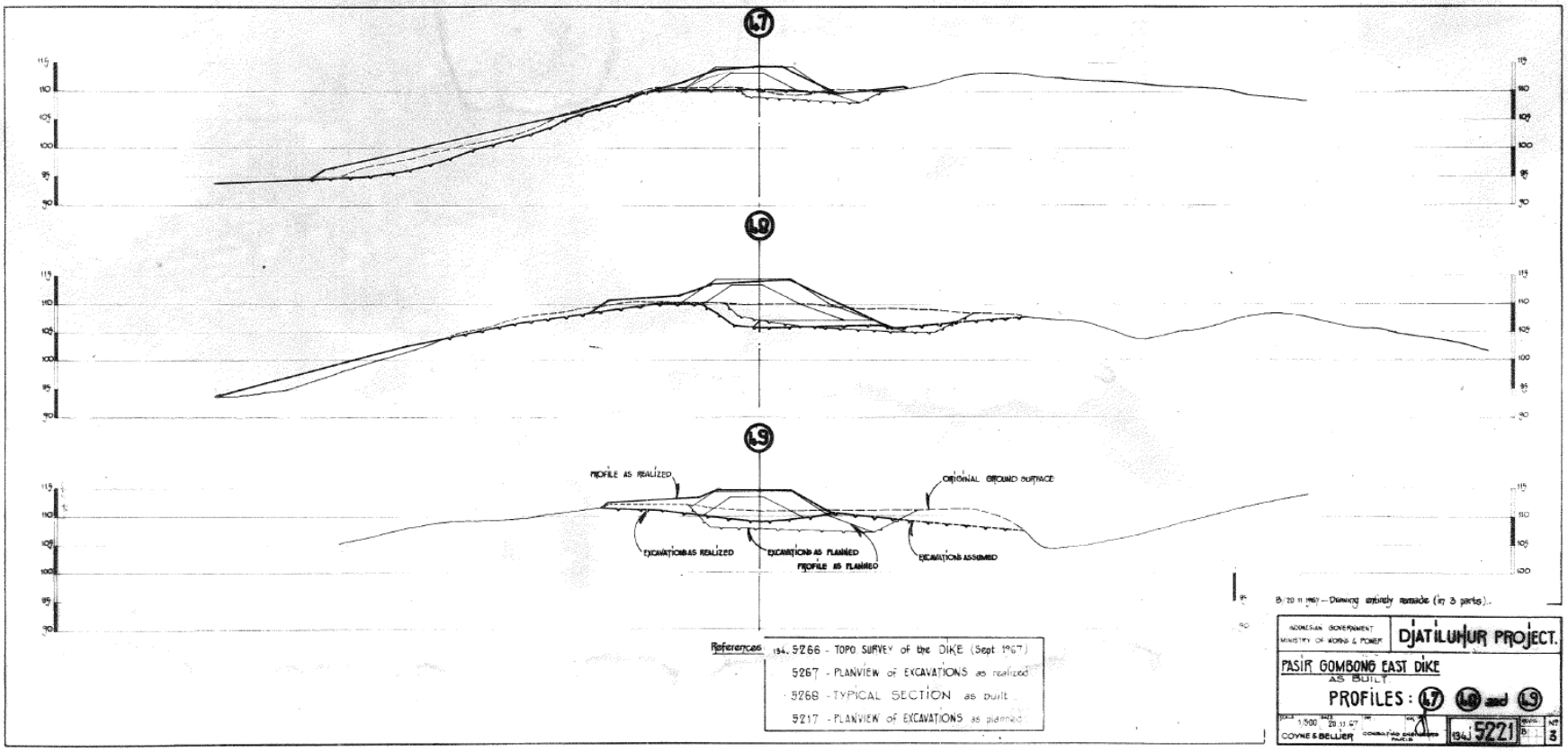
Permen PUPR No. 27/PRT/M/2015. (2015). Bendungan: Kriteria desain, operasi, dan pemeliharaan. Jakarta: Kementerian PUPR.

LAMPIRAN

Lampiran A. Data Umum dan Kondisi Eksisting



Lampiran A. 1 Peta Lokasi Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur



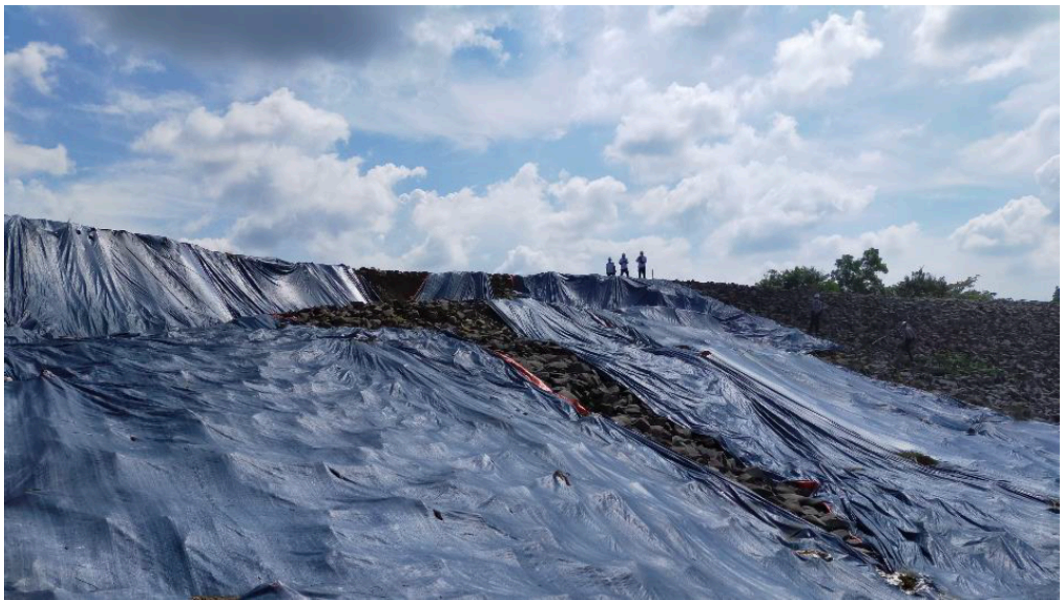
Lampiran A. 2 Penampang Melintang Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur

	Jatiluhur Lake, Tailrace, Rainfall & Turbine being operated												
DATE	AWLR			PEIL SCHAAL				RAINFALL					
	RESERVOIR			RESERVOIR		TAILRACE		ST I	ST II	ST III	MADANG	PASIR GOMBONG
	00:00	07:00	18:00	07:00	18:00	07:00	18:00					
17-Feb-21	96,05	96,01	96,04	96,01	96,04	27	27				0	
18-Feb-21	96,05	96	96,04	96	96,04	27	27				48	
19-Feb-21	96,11	96,08	96,25	96,08	96,25	27	27				83	
20-Feb-21	96,31	96,32	96,65	96,32	96,65	27	27				145	
21-Feb-21	96,78	96,96	96,95	96,96	96,95	27	27,5		36,5		31	
22-Feb-21	97,02	96,98	97,08	96,98	97,08	27	27				0	
23-Feb-21	97,13	97,08	97,27	97,08	97,27	27	27				9	
24-Feb-21	97,23	97,16	97,27	97,16	97,27	27	27				1,5	
25-Feb-21	97,37	97,32	97,32	97,32	97,32	27	27				2,5	
26-Feb-21	97,35	97,46	97,55	97,46	97,55	27	27		8,0		33	
27-Feb-21	97,59	97,61	97,62	97,61	97,62	27	27				0	
28-Feb-21	97,61	97,58	97,62	97,58	97,62	27	27				0	
01-Mar-21	97,58	97,54	97,57	97,54	97,57	27	27				0	
02-Mar-21	97,57	97,53	97,54	97,53	97,54	27	27		20,0		23	
03-Mar-21	97,54	97,51	97,49	97,51	97,49	27	27		19,5		5	

Lampiran A. 3 Data Curah Hujan Pada Saat Kejadian Longsor



Lampiran A. 5 Longsoran Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur Sisi *Upstream*



Lampiran A. 4 Kondisi Bendungan Pelana Pasir Gombong Timur Pasca Longsor



Lampiran A. 6 Pengambilan Sampel Tanah



Lampiran A. 7 Pekerjaan Pengeboran Tanah *(Bor Log)*

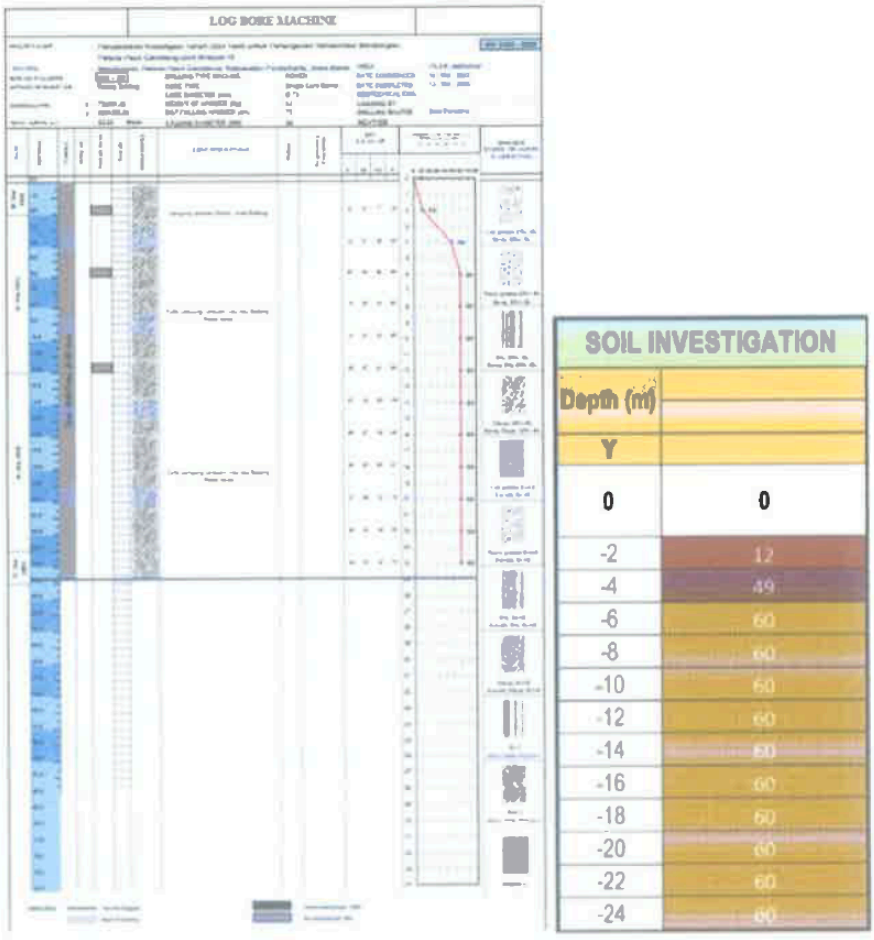






Lampiran A. 8 Wawancana dan Pengumpulan Data Penelitian

Lampiran B. Data Penyelidikan Tanah



LEMPUNG							
Deskripsi	NSPT	γ sat	WARNA	Deskripsi	NSPT	γ sat	WARNA
Very Soft	0-2	16		Very Soft	0-2	16	
Soft	3-4	16.5		Soft	3-4	16.5	
Medium	5-8	17		Medium	5-8	17	
Stiff	9-15	17.5		Stiff	9-15	17.5	
Very Stiff	16-30	18		Very Stiff	16-30	18	
Hard	>30			Hard	>30		

PASIR			
Deskripsi	NSPT	γ sat	WARNA
Very Loose	0-4	16	
Losee	5-10	16.5	
Medium	11-30	17	
Dense	31-50	17.5	
Very Dense	>50	18	

Lampiran B. 1 Data Tanah Pasir Gombong

PROJECT : BENDUNGAN PELANA

LOCATION : PASIR GEMBONG UNIT WILAYAH Iv

CLIENT : -

SUMMARY OF LABORATORY TEST RESULTS

No	Number of Tower	Depth of Sample (Meter)	USCS SOIL CLASS.	INDEX PROPERTIES: Determination of Water Content - Spesific Gravity Volumetric Unit Weight							CLASSIFICATION: Liquid & plastic Limit Determination			GRAIN SIZE ANALYSIS					ENGINEERING PROPERTIES: Triaxial UU		Triaxial CU TEST				CONSOLIDATION TEST	
				Wn (%)	γm (gr/cm³)	γd (gr/cm³)	Void Ratio e	Porosity n	Sr (%)	Spesific Grafvity	WL (%)	WP (%)	IP (%)	GRAVEL (%)	SAND (%)	SILT (%)	CLAY (%)	% finer by Wt. Passing no. 200 sieve	Total Stress Φ Degree	C kg/cm²	Φ Degree	C kg/cm²	Φ' Degree	C' kg/cm²	Cc	Cv cm²/sec
1	BH.01/DS	3.50 4.00	ML	5.562	-	-	-	-	-	2.645	34.19	24.79	9.400	0.00	13.10	45.22	41.68	86.90	Hard		-	-	-	-	-	-
2	BH.01/DS	9.50 - 10.00	CL-ML	6.407	-	-	-	-	-	2.652	31.31	22.67	8.640	0.00	33.61	37.50	28.89	66.39	Hard		-	-	-	-	-	-
3	BH.01/DS	19.50 - 20.00	ML	6.217	-	-	-	-	-	2.638	36.70	25.85	10.850	0.00	8.10	55.37	36.53	91.90	Hard		-	-	-	-	-	-
4	BH.02	1.50 - 2.00	CH	29.260	1.915	1.482	0.788	0.441	98.381	2.649	69.73	26.40	43.330	0.00	1.16	39.91	58.93	98.84	10.695	0.452	11.563	0.487	13.442	0.475	0.240	4.69E-03
5	BH.02	5.50 - 6.00	CH	23.573	1.974	1.597	0.667	0.400	94.066	2.663	65.37	23.28	42.090	0.00	3.53	39.03	57.44	96.47	5.615	0.217	-	-	-	-	0.201	6.15E-03
6	BH.02	11.50 - 12.00	CH	24.227	1.980	1.594	0.655	0.396	97.559	2.638	67.43	23.79	43.640	0.00	4.49	43.03	52.48	95.51	9.473	0.352	-	-	-	-	0.247	4.86E-03

Lampiran B. 2 Rekapitulasi Parameter Fisik Tanah

Index Properties	Project	BENDUNGAN PELANA		
	Location	PASIR GEMBONG UNIT WILAYAH iv		
	Job no		Date	20/05/2025
	Tested By	Fajar	Checked By	MUL

Water Content ASTM D-2216-98

Notes : *Tare is weight of container & ring*

$$\text{Water Content (Wn)} = \frac{\text{Wt. of Water}}{\text{Wt. of dry Soil}} \times 100\ \%$$

$$\text{Unit Weight (gn)} = \frac{\text{Wt. of Wet Soil}}{\text{Vol of Ring}}$$

Bor Number		BH.01/DS		BH.01/DS		BH.01/DS	
Location		-		-		-	
Depth of meter	m	3.50 - 4.00		9.50 - 10.00		19.50 - 20.00	
Container Number		N16	W10	C7	UI	N01	U4
Wt. Sample + Tare Wet	gr	36.170	49.760	35.070	46.370	36.790	45.620
Wt. Sample + Tare Dry	gr	34.620	47.510	33.260	44.050	35.010	43.310
Wt. of Water	gr	1.550	2.250	1.810	2.320	1.780	2.310
Tare	gr	6.750	7.060	5.250	7.530	5.420	7.320
Wt. of Dry Soil	gr	27.870	40.450	28.010	36.520	29.590	35.990
Water Content	%	5.562	5.562	6.462	6.353	6.016	6.418
Average Water Content	%		5.562		6.407		6.217
Wt. of Wet Soil	gr						
Vol of Ring	cc						
Unit Weight	gr/cm^3						

Bor Number		BH.02		BH.02		BH.02	
Location		-		-		-	
Depth of meter	m	1.50 - 2.00		5.50 - 6.00		11.50 - 12.00	
Container Number		C101	Z61	UI	S2	Z21	Z2
Wt. Sample + Tare Wet	gr	47.050	43.950	43.590	41.320	55.660	42.350
Wt. Sample + Tare Dry	gr	37.620	35.190	36.020	34.620	45.810	35.290
Wt. of Water	gr	9.430	8.760	7.570	6.700	9.850	7.060
Tare	gr	5.220	5.410	4.270	5.870	5.290	6.050
Wt. of Dry Soil	gr	32.400	29.780	31.750	28.750	40.520	29.240
Water Content	%	29.105	29.416	23.843	23.304	24.309	24.145
Average Water Content	%		29.260		23.573		24.227
Wt. of Wet Soil	gr						
Vol of Ring	cc						
Unit Weight	gr/cm^3						

Lampiran B. 3 Kadar Air

Index Properties

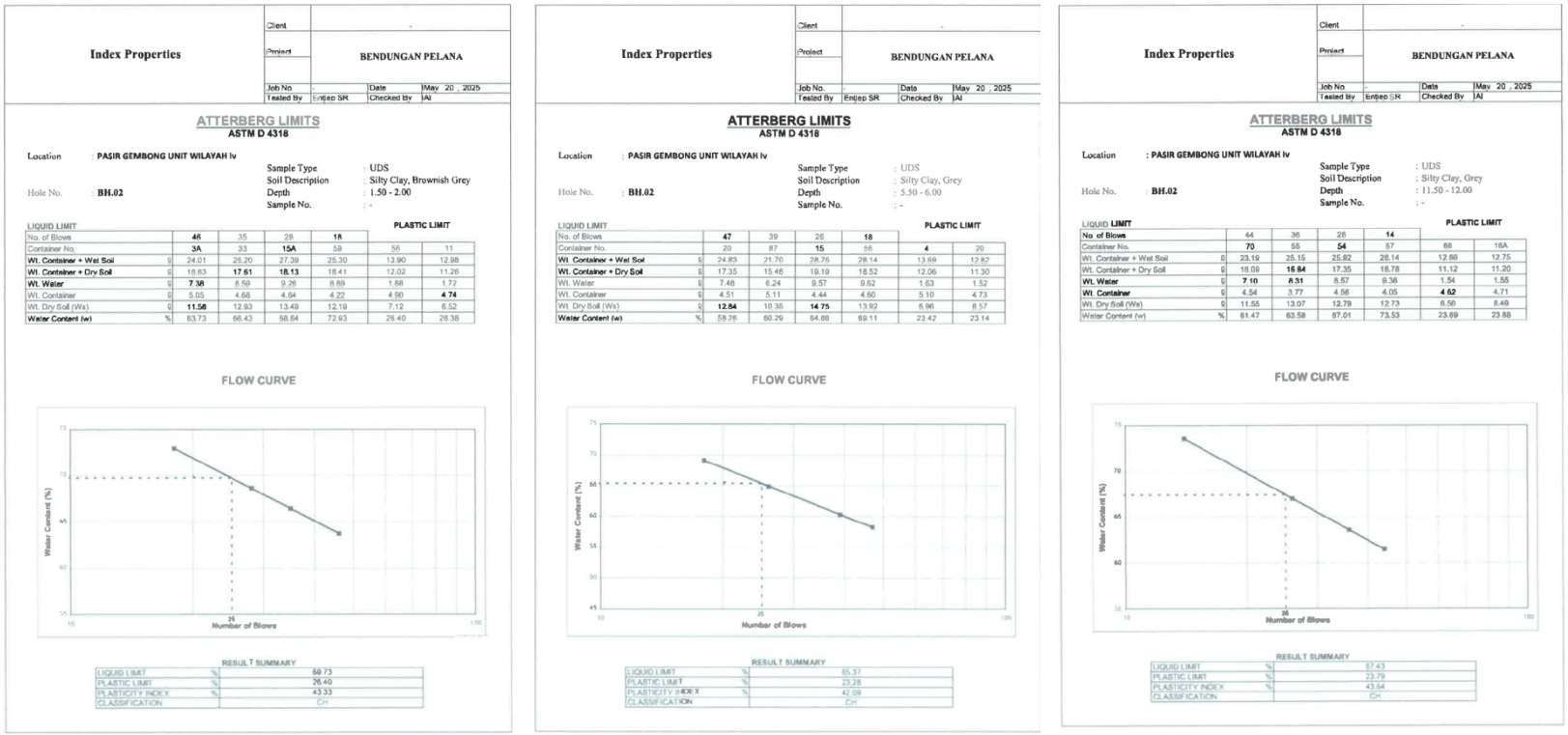
Project	BENDUNGAN PELANA			
Location	PASIR GEMBONG UNIT WILAYAH iv			
Job no		Date	20/05/2025	
Tested By	AJI	Checked By	MUL	

UNIT WEIGHT DENSITY (γ_m) ASTM D-4718-07

Bor Number		BH.01/DS		BH.01/DS		BH.01/DS	
Location		-		-		-	
Depth of meter		3.50 - 4.00		9.50 - 10.00		19.50 - 20.00	
Ring No							
Weight Of Ring +Soil	gr						
Weight Of Ring	gr						
Height Of Ring	cm						
Diameter Of Ring	cm						
Volume Of Ring	cm^3						
Weight Of Soil	gr						
Unit Weight Density	gr/cm^3						
Average Unit Weight Density	gr/cm^3	Hard		Hard		Hard	

Bor Number		BH.02		BH.02		BH.02	
Location		-		-		-	
Depth of meter		1.50 - 2.00		5.50 - 6.00		11.50 - 12.00	
Ring No		8	8	9	9	10	10
Weight Of Ring +Soil	gr	135.960	135.880	143.800	143.730	112.200	112.110
Weight Of Ring	gr	60.710	60.710	66.260	66.260	34.400	34.400
Height Of Ring	cm	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Diameter Of Ring	cm	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Volume Of Ring	cm^3	39.270	39.270	39.270	39.270	39.270	39.270
Weight Of Soil	gr	75.250	75.170	77.540	77.470	77.800	77.710
Unit Weight Density	gr/cm^3	1.916	1.914	1.975	1.973	1.981	1.979
Average Unit Weight Density	gr/cm^3		1.915		1.974		1.980

Lampiran B. 4 Berat Jenis Tanah



Index Properties

Client : -
Project : BENDUNGAN PELANA
Job No : -
Date : May 20 , 2025
Tested By : Entjep SR
Checked By : Al

ATTERBERG LIMITS
ASTM D 4318

Location : PASIR GEMBONG UNIT WILAYAH Iv
Hole No. : BH.02
Sample Type : UDS
Soil Description : Silty Clay, Brownish Grey
Depth : 1.50 - 2.00
Sample No. : -

LIQUID LIMIT						PLASTIC LIMIT	
No. of Blows		**46**	35	28	**18**		
Container No.		**3A**	33	**15A**	58	56	11
Wt. Container + Wet Soil	g	24.01	26.20	27.39	25.30	13.90	12.98
Wt. Container + Dry Soil	g	18.83	**17.61**	**18.13**	18.41	12.02	11.26
Wt. Water	g	**7.38**	8.59	9.26	8.89	1.88	1.72
Wt. Container	g	5.05	4.68	4.84	4.22	4.90	**4.74**
Wt. Dry Soil (Ws)	g	**11.58**	12.93	13.49	12.19	7.12	6.52
Water Content (w)	%	63.73	66.43	68.64	72.93	26.40	26.38

FLOW CURVE

RESULT SUMMARY

LIQUID LIMIT	%	66.73
PLASTIC LIMIT	%	26.40
PLASTICITY INDEX	%	43.33
CLASSIFICATION		CH

Index Properties

Client : -
Project : BENDUNGAN PELANA
Job No : -
Date : May 20 , 2025
Tested By : Entjep SR
Checked By : Al

ATTERBERG LIMITS
ASTM D 4318

Location : PASIR GEMBONG UNIT WILAYAH Iv
Hole No. : BH.02
Sample Type : UDS
Soil Description : Silty Clay, Grey
Depth : 5.50 - 6.00
Sample No. : -

LIQUID LIMIT						PLASTIC LIMIT	
No. of Blows		**47**	39	26	**18**		
Container No.		29	87	**15**	56	**4**	20
Wt. Container + Wet Soil	g	24.83	21.70	28.76	28.14	13.69	12.82
Wt. Container + Dry Soil	g	17.35	15.46	19.19	18.52	12.06	11.30
Wt. Water	g	7.48	6.24	9.57	9.62	1.63	1.52
Wt. Container	g	4.51	5.11	4.44	4.60	5.10	4.73
Wt. Dry Soil (Ws)	g	**12.84**	10.35	**14.75**	13.92	6.96	6.57
Water Content (w)	%	58.26	60.29	64.88	69.11	23.42	23.14

FLOW CURVE

RESULT SUMMARY

LIQUID LIMIT	%	65.37
PLASTIC LIMIT	%	23.28
PLASTICITY INDEX	%	42.09
CLASSIFICATION		CH

Index Properties

Client : -
Project : BENDUNGAN PELANA
Job No : -
Date : May 20 , 2025
Tested By : Entjep SR
Checked By : Al

ATTERBERG LIMITS
ASTM D 4318

Location : PASIR GEMBONG UNIT WILAYAH Iv
Hole No. : BH.02
Sample Type : UDS
Soil Description : Silty Clay, Grey
Depth : 11.50 - 12.00
Sample No. : -

LIQUID LIMIT						PLASTIC LIMIT	
No. of Blows		44	36	26	**14**		
Container No.		**70**	55	**54**	57	88	18A
Wt. Container + Wet Soil	g	23.19	25.15	25.92	28.14	12.66	12.75
Wt. Container + Dry Soil	g	18.09	**16.84**	17.35	18.78	11.12	11.20
Wt. Water	g	**7.10**	8.31	8.57	9.36	1.54	1.55
Wt. Container	g	4.54	3.77	4.56	4.05	**4.62**	4.71
Wt. Dry Soil (Ws)	g	11.55	13.07	12.79	12.73	6.50	6.49
Water Content (w)	%	61.47	63.58	67.01	73.53	23.69	23.88

FLOW CURVE

RESULT SUMMARY

LIQUID LIMIT	%	67.43
PLASTIC LIMIT	%	23.79
PLASTICITY INDEX	%	43.64
CLASSIFICATION		CH

Lampiran B. 5 ***Atteberg Limit***

	RESULT OF (HASIL PENGUJIAN)	No. Formulir	
	TRIAXIAL TEST	Terbitan/ Revisi	
	SHEAR TEST	Tanggal Revisi	

Project Initial

Project (proyek)	: BENDUNGAN PELANA
Location (lokasi)	: Pasir Gembong Unit Wilayah IV
No of Sample (no.contoh)	: BH.02
Depth (kedalaman)	: 1.50 - 2.00

Sample Initial

Diameter (diameter)	: 3.80 cm
Height (tinggi)	: 7.60 cm
Area (luas)	: 11 cm
Volume (volume)	: 86.193 cm
Weight of Sample (berat contoh)	: 165.50 gr
Soil Type (jenis tanah)	: Silty Clay
Colour (warna)	: Brownish Grey

Apparatus Initial

Callbration (faktor kalibrasi) (CR)	: 0.113 kg/div
Strain rate (kecepatan pembebanan)	: 0.02 mm/min
Cell Pressure (tekanan sel) σ3	: 2.40 kg/cm2
Back Pressure (tekanan balik)	: 1.90 kg/cm2
Total Stress (tegangan total)	: 0.50 kg/cm2
Date of Test (tanggal uji)	: 23/5/2025
Tested by (penguji)	: Basri
Signature (tandatangan)	
Checked by (diperiksa)	:
Signature (tandatangan)	

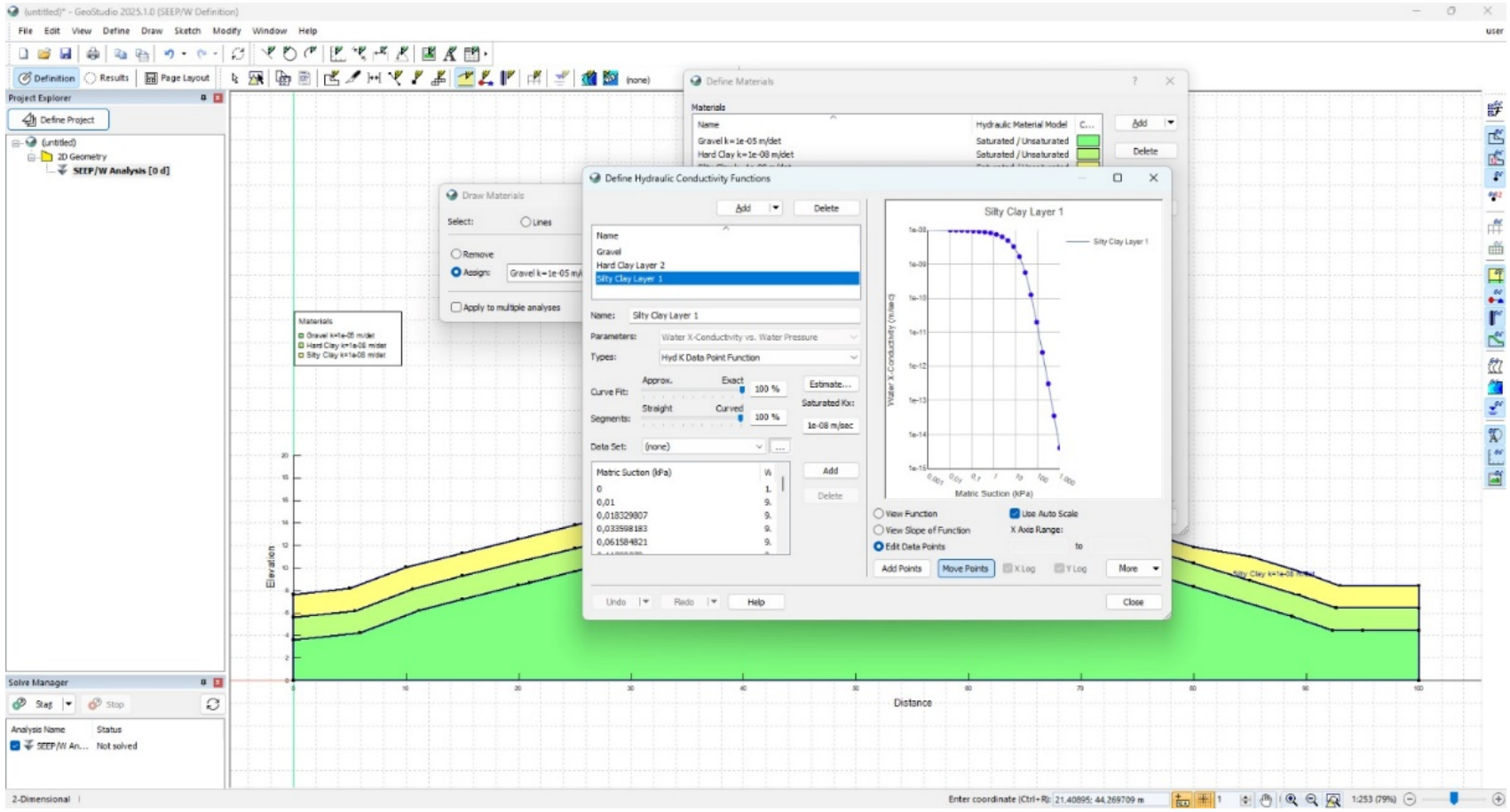
Time	Settlement (penurunan)	Prov. Ring reading (Pembacaan proving ring)	Epsilon	Correction Area	Force	Shear Stress (Tegangan Geser)	Pore Pressure (tekanan pori)	Effective Stress (Tegangan Efektif)	Remark (Catatan)
	ΔH		ε	A	P	σ1			
	(mm)	(div)	(%)	A (cm²)	P (kg)	σ1 (kg/cm²)	U (kg/cm²)	σ3 (kg/cm²)	
	0.00	0.0	0.0	11.3	0.0	0.000	1.900	0.500	
	0.20	40.0	0.26	11.4	4.52	0.397	1.910	0.490	
	0.40	66.0	0.53	11.4	7.46	0.654	1.920	0.480	
	0.60	95.0	0.79	11.4	10.74	0.939	1.930	0.470	
	0.80	110.5	1.05	11.5	12.49	1.089	1.940	0.460	
	1.00	119.0	1.32	11.5	13.45	1.170	1.950	0.450	
	1.20	125.0	1.58	11.5	14.13	1.228	1.960	0.440	
	1.40	131.0	1.84	11.6	14.80	1.281	1.970	0.430	
	1.60	136.0	2.11	11.6	15.37	1.327	1.980	0.420	
	1.80	141.0	2.37	11.6	15.93	1.372	1.990	0.410	
	2.00	144.5	2.63	11.6	16.33	1.407	2.000	0.410	
	2.20	147.0	2.89	11.7	16.61	1.422	1.990	0.410	
	2.40	149.0	3.16	11.7	16.84	1.439	2.000	0.400	
	2.60	149.0	3.42	11.7	16.84	1.434	2.000	0.400	
	2.80	148.5	3.68	11.8	16.78	1.425	2.010	0.390	

Lampiran B. 6 Uji Kuat Geser Tanah

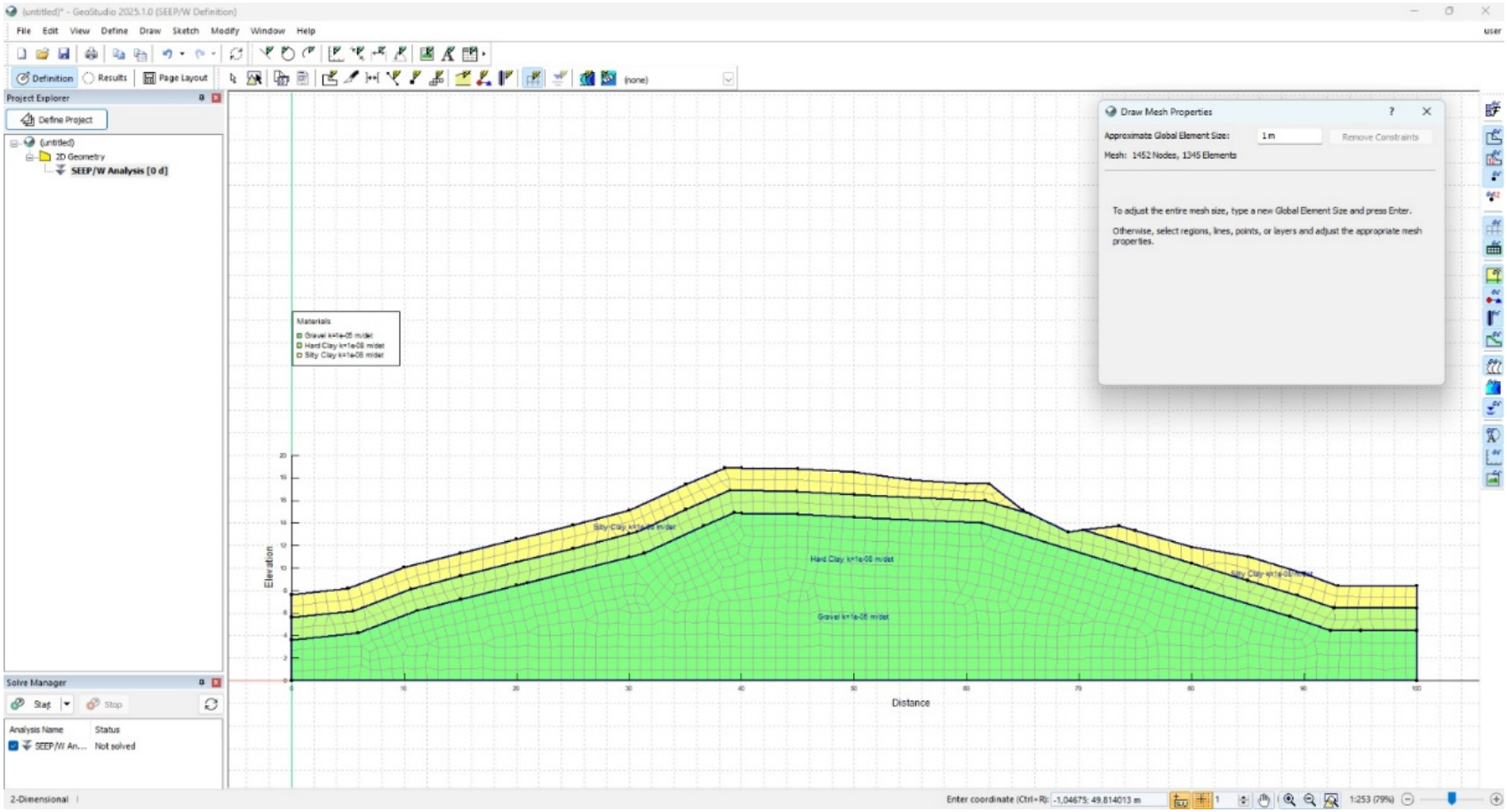
Lampiran C. Pemodelan Analisis Rembesan (*SEEP*/W)



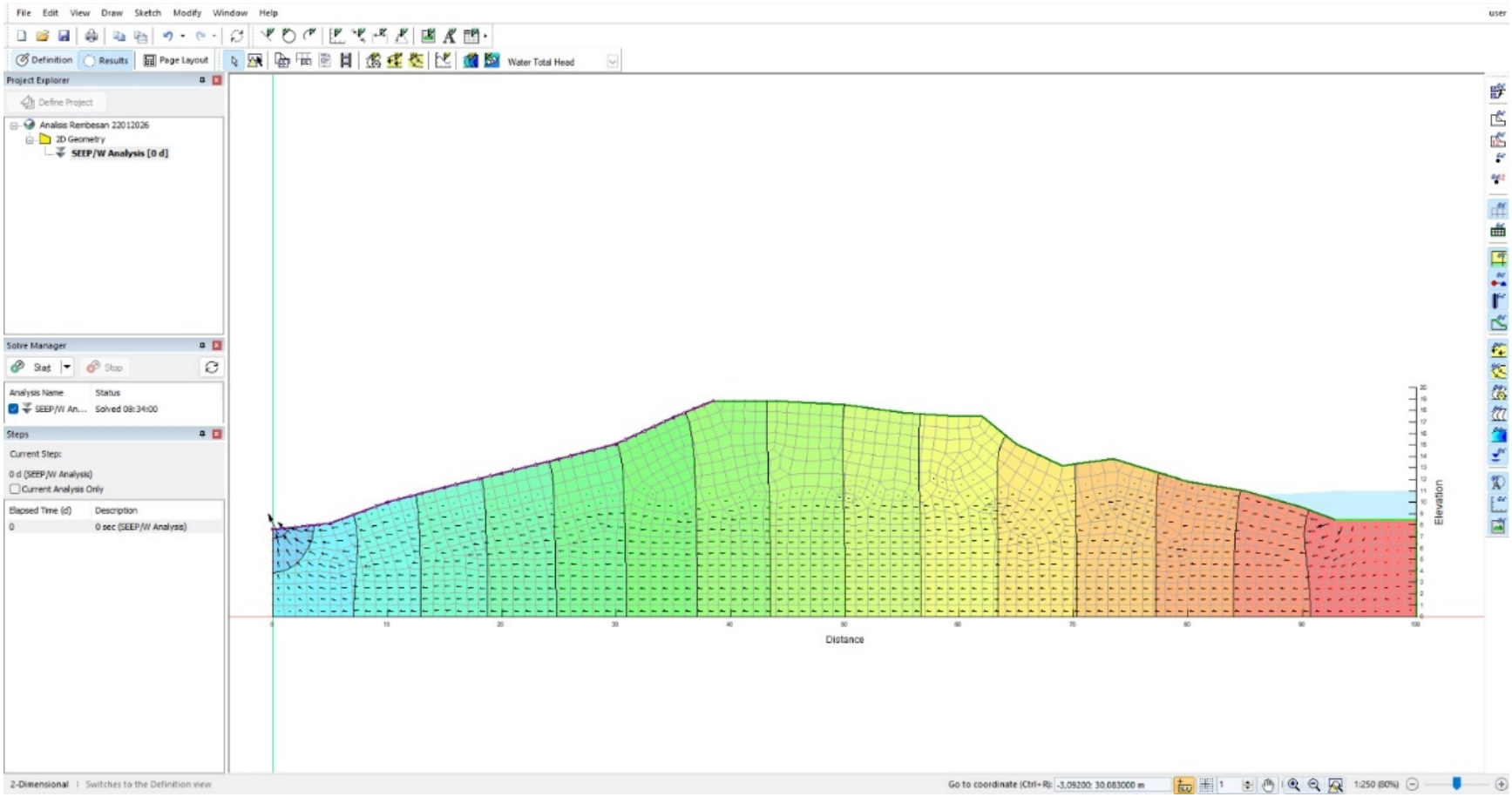
Lampiran C. 1 Geometri Dan Pembagian Zona Material



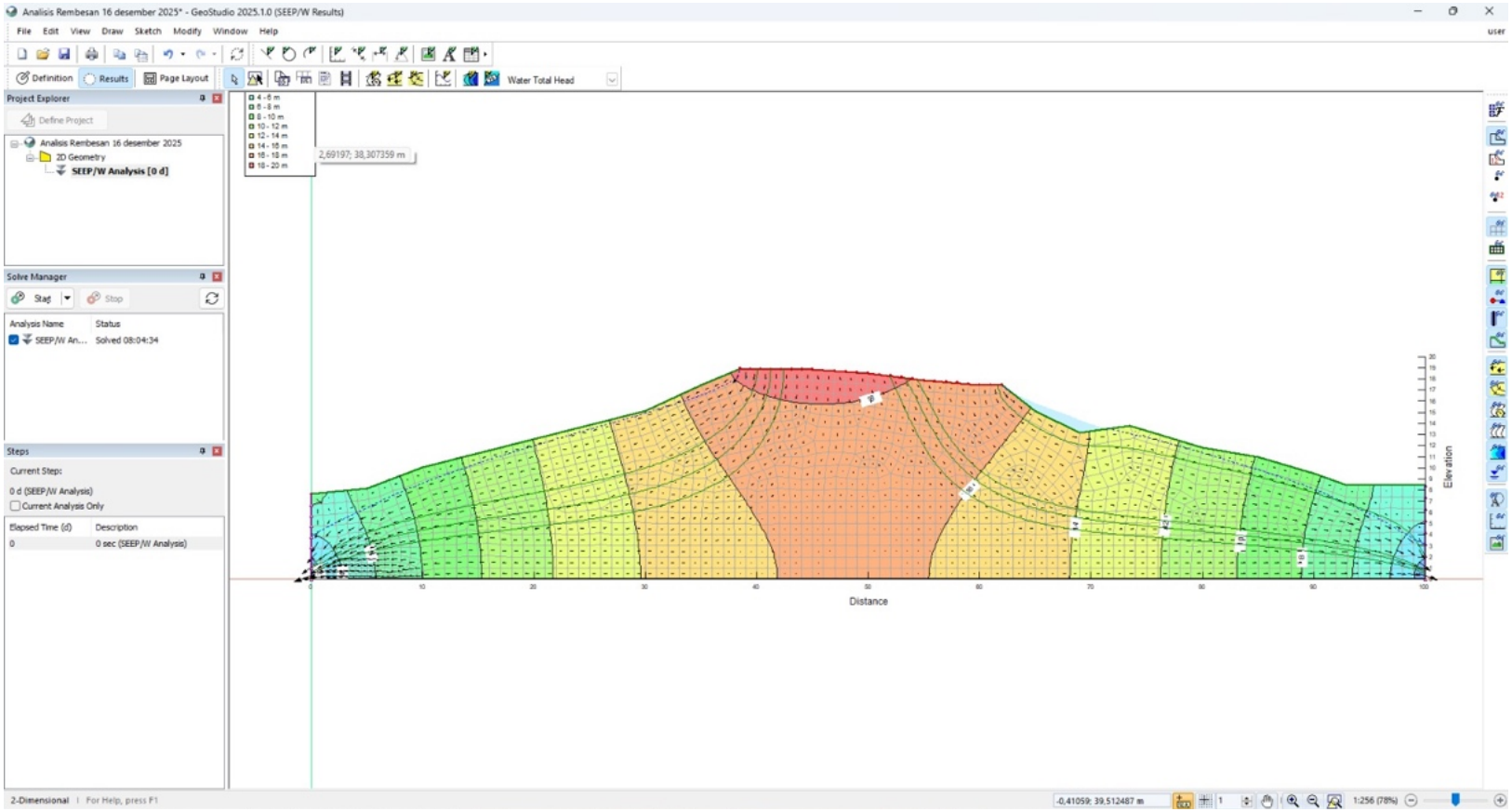
Lampiran C. 2 Penetapan Parameter Hidraulik Tanah



Lampiran C. 3 Pengaturan Kepadatan *Mesh*

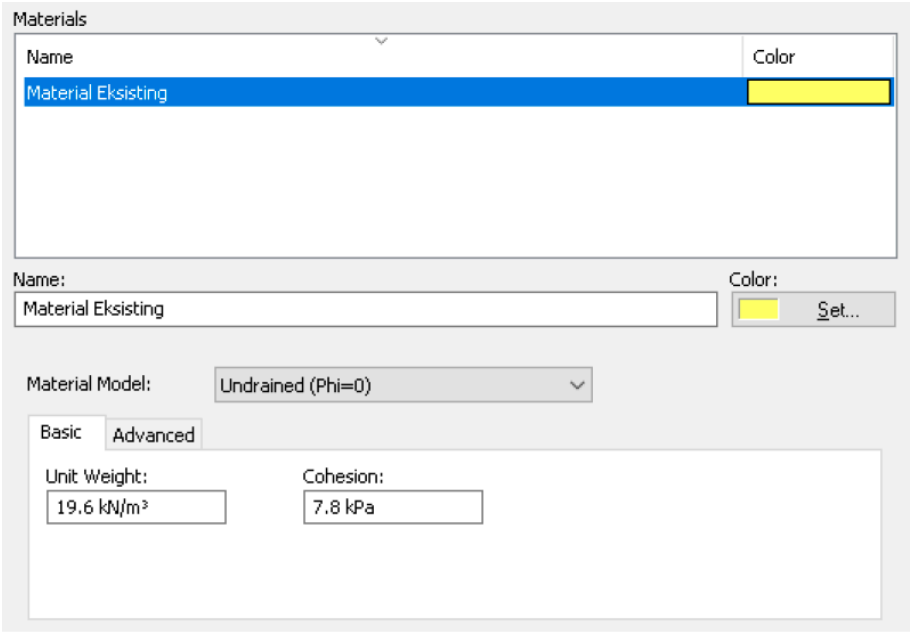


Lampiran C. 4 Pola Aliran Rembesan *(Flow Net)*

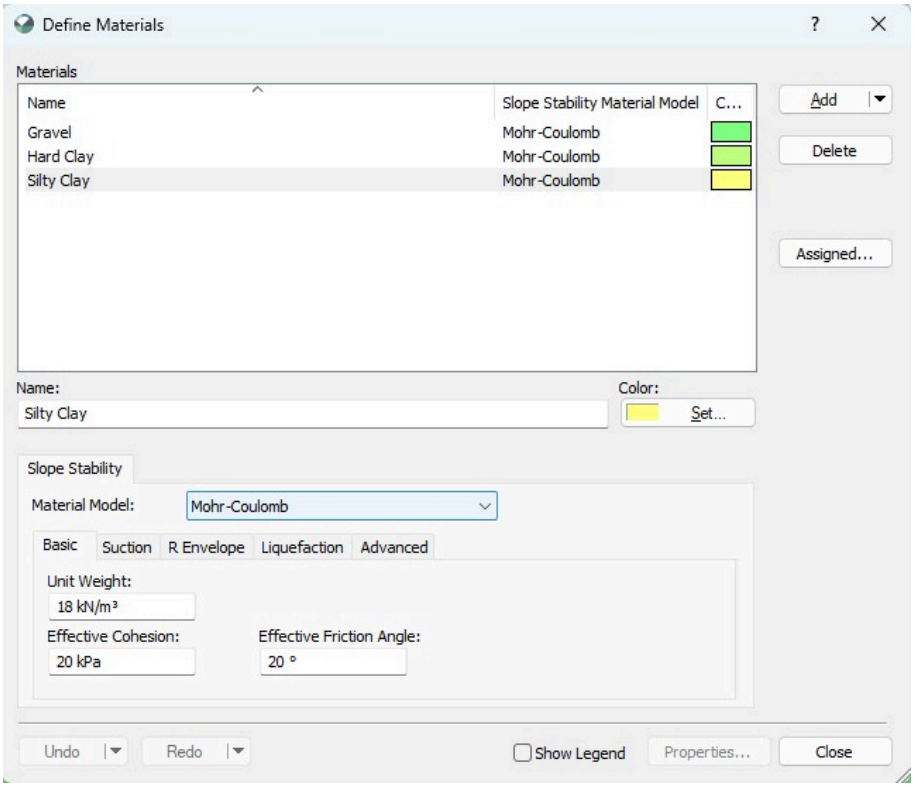


Lampiran C. 5 Pola Aliran Rembesan Kondisi Hujan

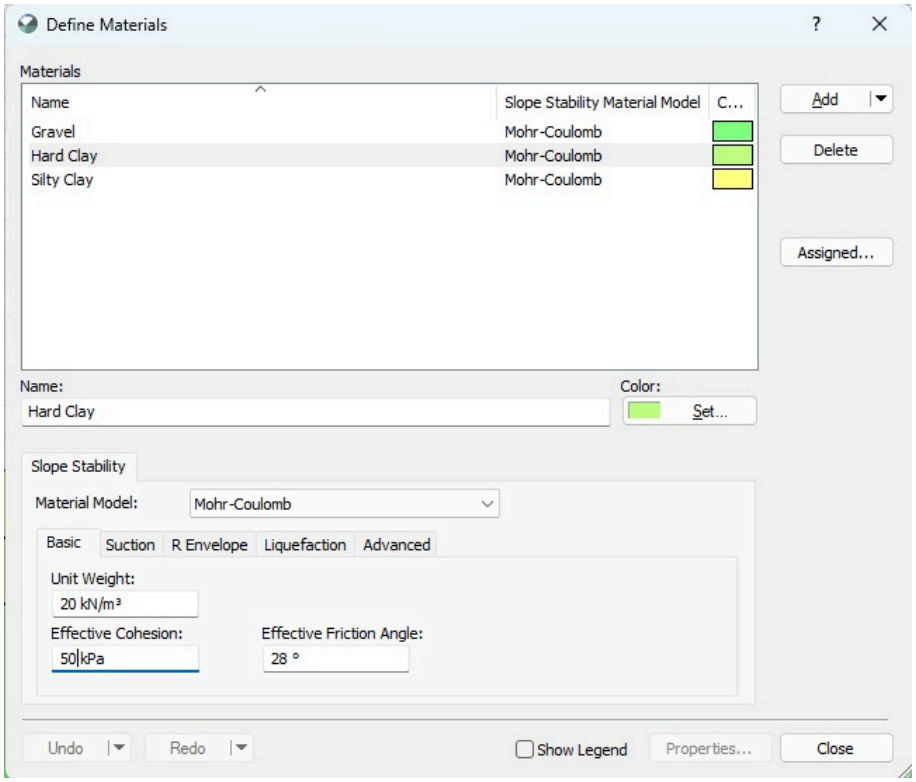
Lampiran D. Pemodelan Analisis Stabilitas Lereng (*SLOPE*/W)



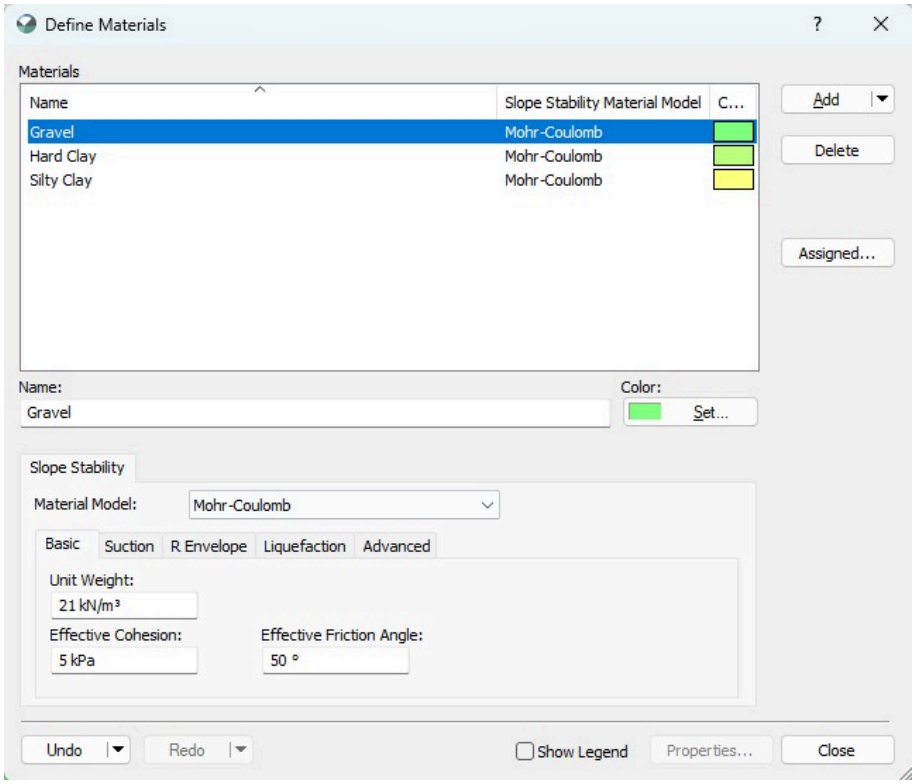
Lampiran D. 1 Parameter Kuat Geser Tanah (Eksisting)



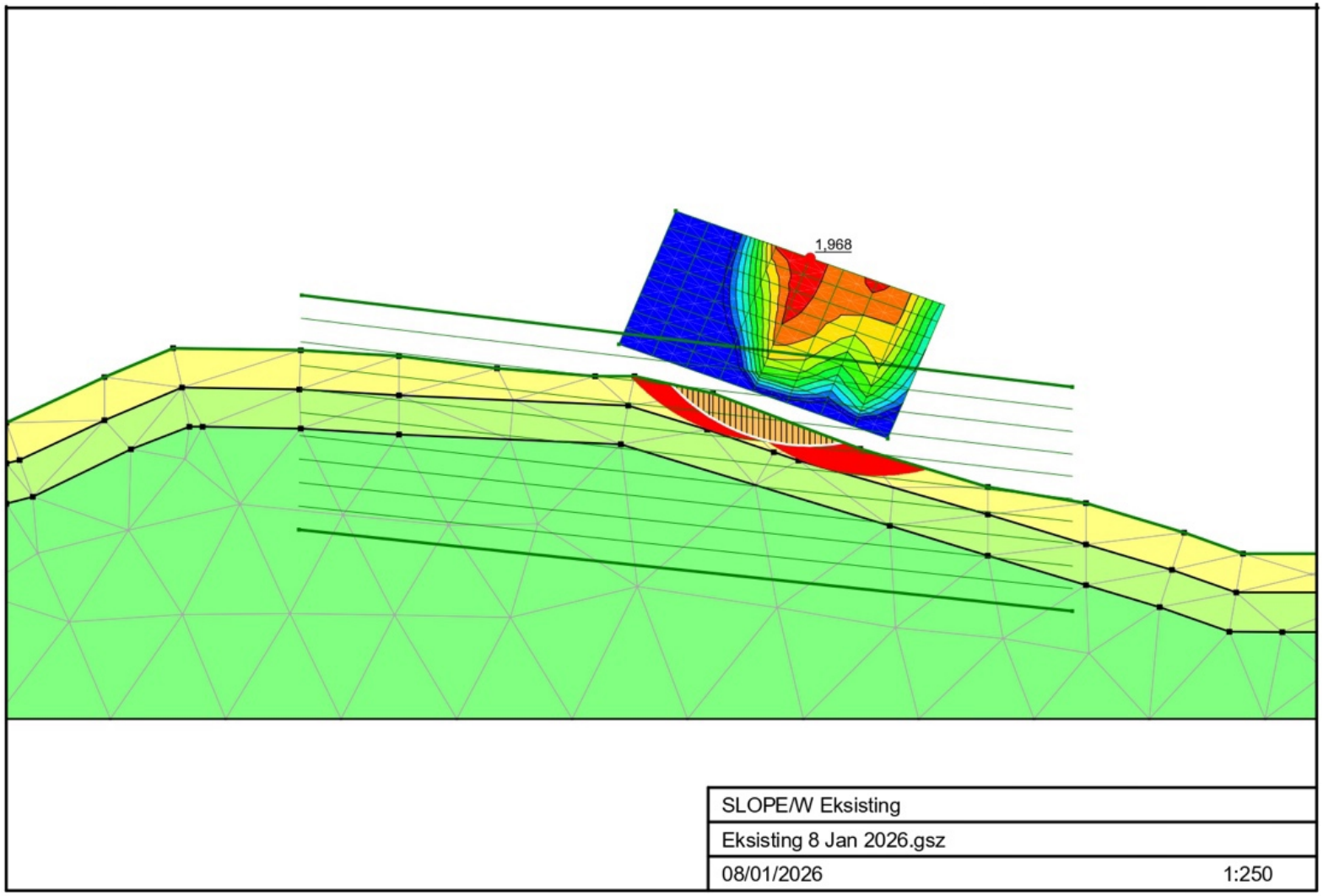
Lampiran D. 2 Parameter Kuat Geser Tanah *Silty Clay*



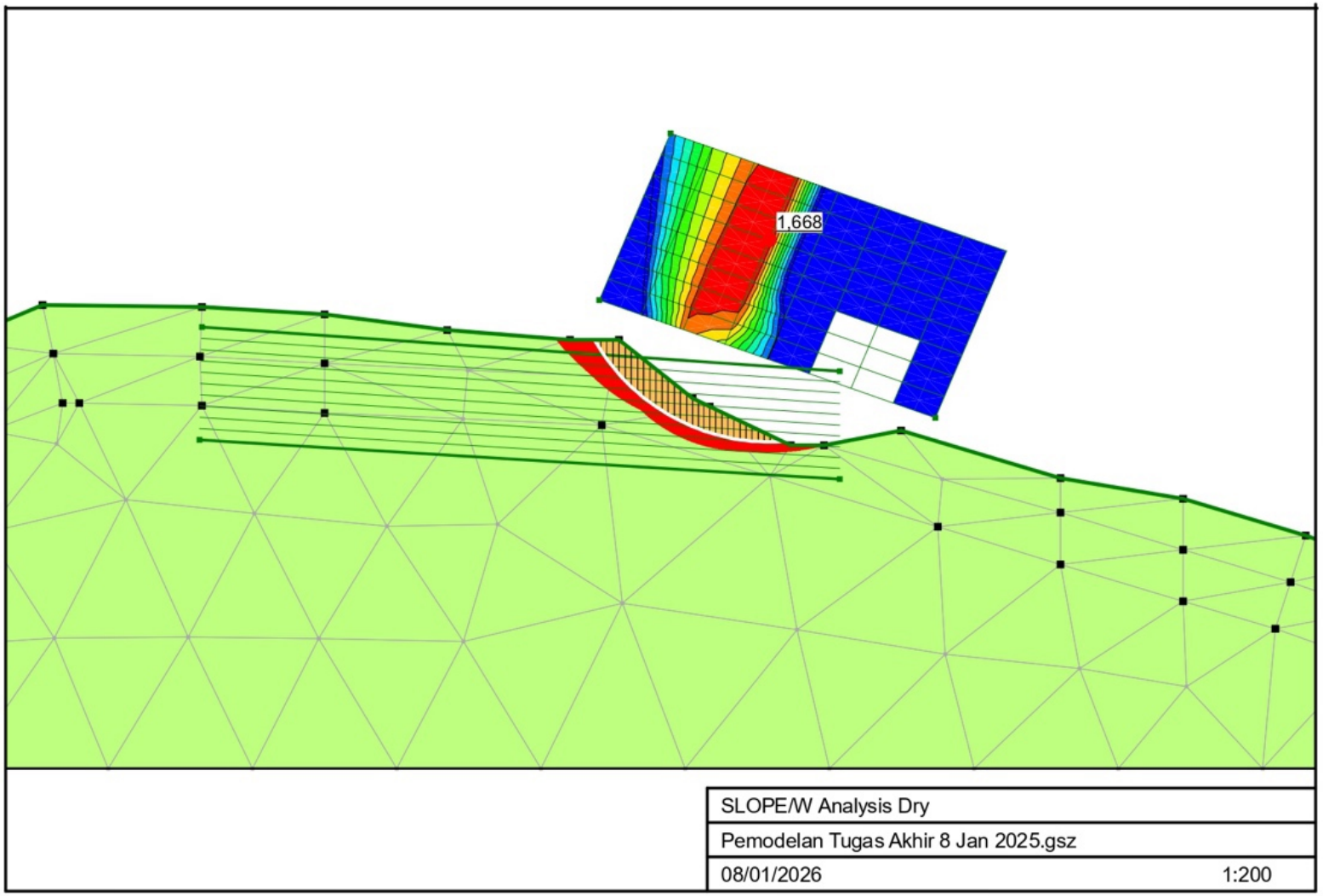
Lampiran D. 3 Parameter Kuat Geser Tanah *Hard Clay*



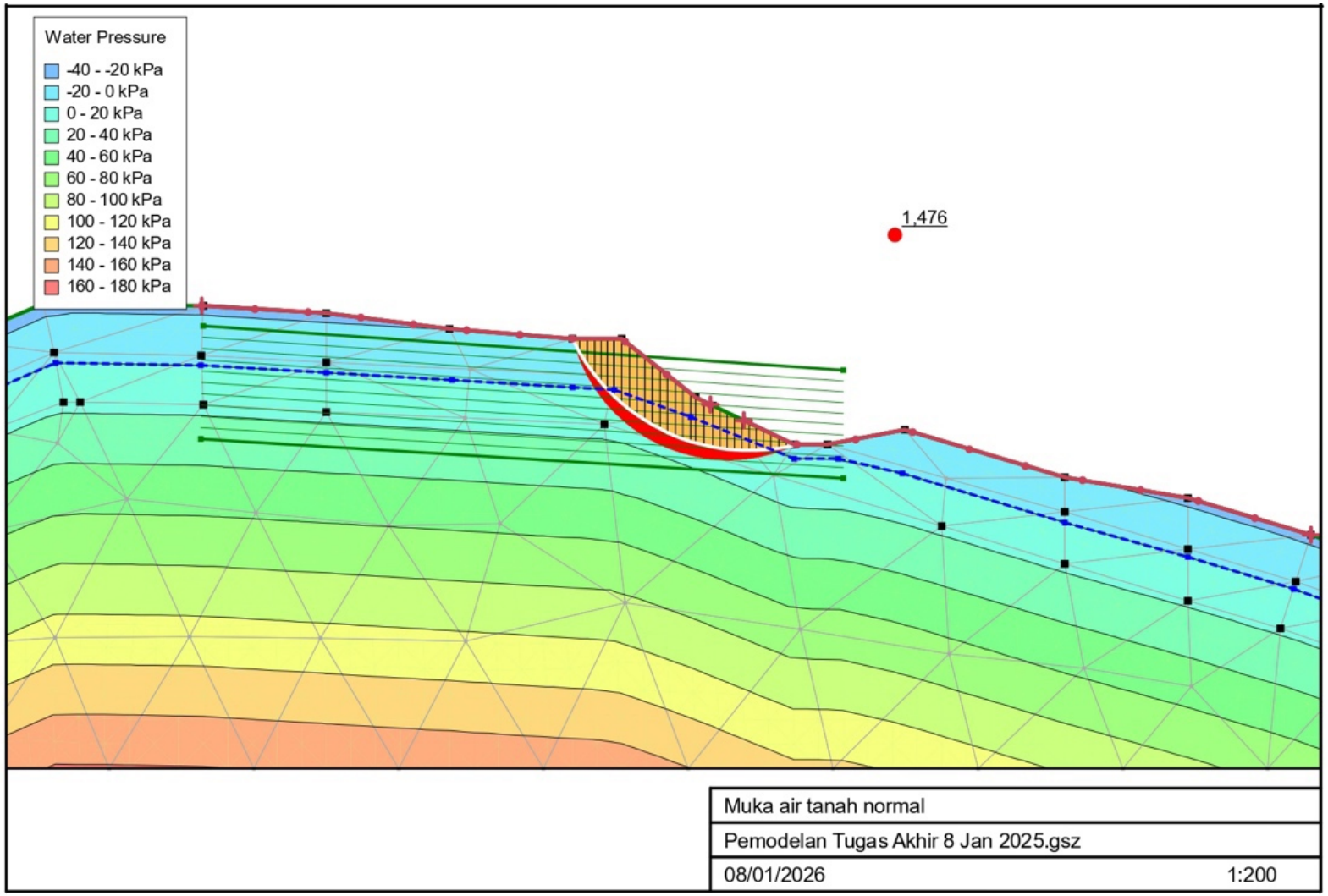
Lampiran D. 4 Parameter Kuat Geser Tanah *Gravel*



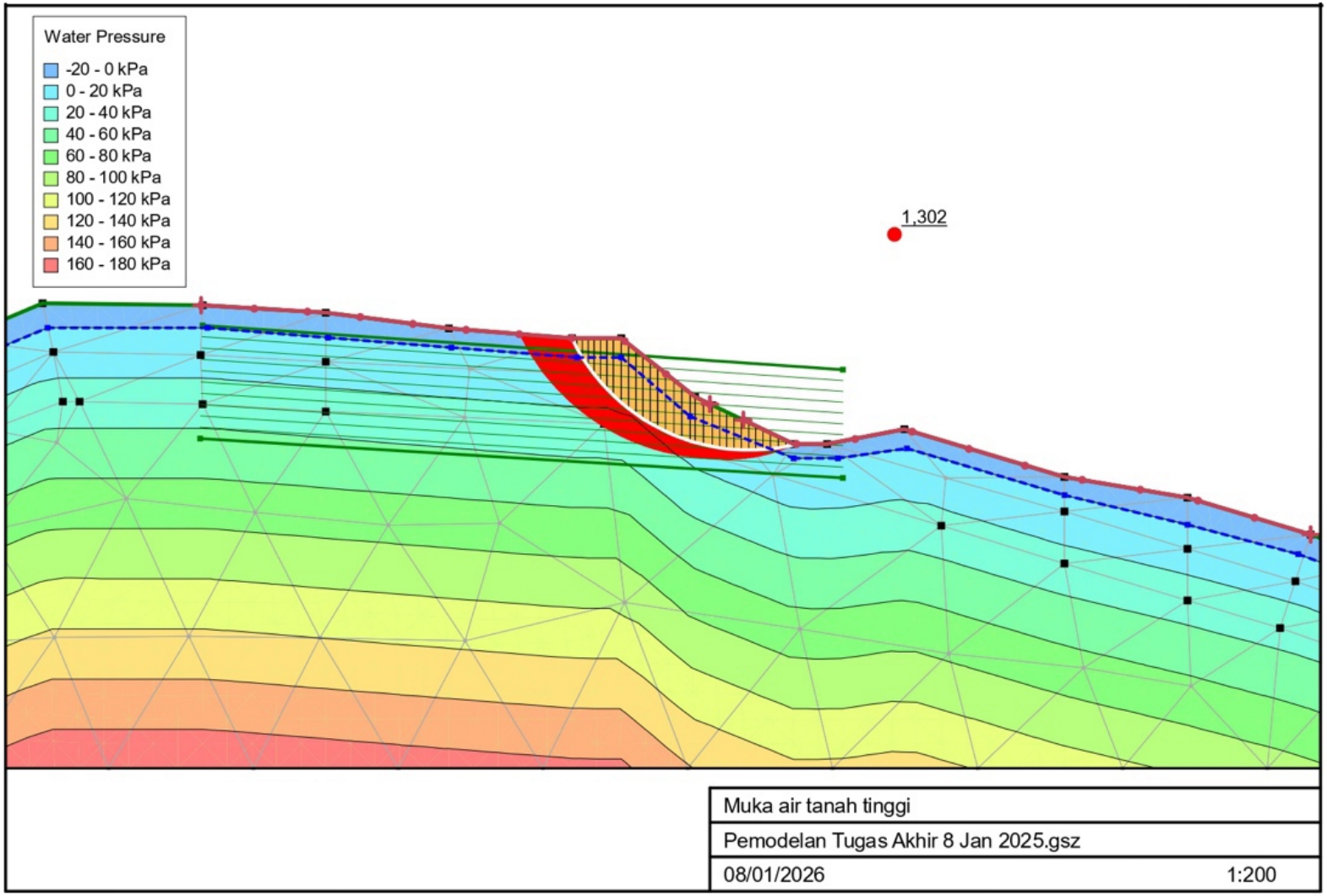
Lampiran D. 5 Hasil Analisis *Factor of Safety* (FS) Eksisting



Lampiran D. 6 Hasil Analisis *Factor of Safety* (FS) Setelah Longsor



Lampiran D. 7 Hasil Analisis *Factor of Safety* (FS) Muka Air Normal



Lampiran D. 8 Hasil Analisis *Factor of Safety* (FS) Muka Air Tinggi

Lampiran E. Lembar Bimbingan Skripsi

UNIVERSITAS SANGGA BUANA YPKP

FORMULIR BIMBINGAN/ASISTENSI (TUGAS AKHIR)

ANALISIS PENYEBAB TERJADINYA KELONGSORAN PADA TUBUH BENDUNGAN (STUDI KASUS BENDUNGAN PELANA PASIR GOMBONG TIMUR PADA BENDUNGAN IR. H. DJUANDA JATILUHUR)

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

Mahasiswa :	Dosen Pembimbing :	TA
Lukman Nurrahman 2112221029	Dwi Haryono Aji Wibowo, S.T., M.T.	2025-2026

No.	Tanggal Pertemuan	Uraian Kegiatan, Catatan Perbaikan	Paraf Pembimbing
1	25 Nov 2025	Pembahasan judul penelitian agar lebih spesifik dengan permasalahan geoteknik bendungan.	
2	2 Des 2025	Pembahasan latar belakang, identifikasi masalah, dan rumusan masalah pada BAB I.	
3	10 Des 2025	Pembahasan tinjauan pustaka dan konsep dasar yang digunakan dalam penelitian.	
4	17 Des 2025	Pembahasan metodologi penelitian (BAB III), meliputi desain penelitian, teknik sampling, dan pengumpulan data.	
5	9 Jan 2026	Pembahasan data teknis dan persiapan analisis menggunakan perangkat lunak GeoStudio (SEEP/W dan SLOPE/W).	
6	14 Jan 2026	Pembahasan hasil analisis stabilitas lereng dan rembesan pada BAB IV.	
7	19 Jan 2026	Pembahasan terkait penambahan analisis rembesan dengan metode runoff.	
8	4 Feb 2026	Pembahasan kesimpulan dan saran (BAB V) serta keterkaitannya dengan tujuan penelitian.	

Bandung, 9 Februari 2026

Dosen Pembimbing,

Dwi Haryono Aji Wibowo, S.T., M.T.

Lampiran E. 1 Lembar Bimbingan Tugas Akhir

PUSTAKALAYA
UNIVERSITAS SANGGA BUANA
YAYASAN PENDIDIKAN KEUANGAN DAN PERBANKAN
Jl. PHH. Mustofa No.68, Kel. Cikutra, Kec. Cibeunying Kidul, Kota Bandung
Website: pustakalaya.usbypkp.ac.id Email: library@usbypkp.ac.id

Surat Keterangan Cek Plagiarisme

Nomor: 071/II/SKCP/USB-YPKP/2026

Sehubungan dengan kewajiban **Cek Plagiarisme** dengan ***similarity check maximal 25%*** sebagai salah satu kelengkapan persyaratan administrasi bagi mahasiswa tingkat akhir, dengan ini UPT Perpustakaan Universitas Sangga Buana menerangkan bahwa:

Nama	: Lukman Nurrahman
NPM	: 2112221029
Program Studi	: S1 Teknik Sipil
Judul Karya Tulis Ilmiah	:"ANALISIS PENYEBAB TERJADINYA KELONGSORAN PADA TUBUH BENDUNGAN (STUDI KASUS BENDUNGAN PELANA PASIR GOMBONG TIMUR PADA BENDUNGAN IR. H. DJUANDA JATILUHUR)"
Tanggal Cek Turnitin	:20 Februari 2026
Status	: Lulus dengan **9%** *Similaraty Check*

Adalah benar telah dilakukan ***similarity check*** sebagaimana data tersebut diatas, dan surat ini dibuat berdasarkan keadaan yang sebenar benarnya, untuk bisa dipergunakan sebagaimana mestinya.

Bandung,20 Februari 2026

Kepala Pustakalaya

Widyapuri Prasastiningtyas, S.Sos., M.I.kom.

NIP. 432.200.173