

**TUGAS AKHIR**

**ANALISIS KESTABILAN BENDUNGAN TERHADAP  
REMBESAN DAN *PIPING*  
(STUDI KASUS BENDUNGAN JRAGUNG KABUPATEN SEMARANG)**

Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan dalam Menyelesaikan  
Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung



Disusun oleh:

**Rekhan Farras Sutrisno**

NIM. 30202100178

**Riko Bagus Setiawan**

NIM. 30202100183

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG**

**2025**

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISIS KESTABILAN BENDUNGAN TERHADAP REMBESAN DAN *PIPING* (STUDI KASUS BENDUNGAN JRAGUNG KABUPATEN SEMARANG)



**Rekhan Farras Sutrisno**  
NIM. 30202100178



**Riko Bagus Setiyawan**  
NIM. 30202100183

Telah disetujui dan disahkan di Semarang, Agustus 2025

Tim Penguji

1. **Dr. Abdul Rochim, ST., MT**  
NIDN. 0608067601
2. **Ir. Lisa Fitriyana, ST., M.Eng**  
NIDN. 0631128901

Tanda Tangan

Ketua Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik  
Universitas Islam Sultan Agung Semarang



**Muhamad Rusli Ahyar, ST., M. Eng**  
NIDN. 0625059102

**USULAN PROPOSAL TUGAS AKHIR**

**ANALISIS KESTABILAN BENDUNGAN TERHADAP  
REMBESAN DAN *PIPING*  
(STUDI KASUS BENDUNGAN JRAGUNG KABUPATEN SEMARANG)**

Diajukan oleh,

**Rekhan Farras Sutrisno**

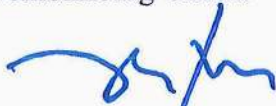
NIM. 30202100178

**Riko Bagus Setiyawan**

NIM. 30202100183

Telah disetujui oleh :

Pembimbing Utama



**Dr. Abdul Rochim, ST., MT**  
NIDN. 0608067601

Tanggal : 28 Agustus 2025

Disetujui,  
Ketua Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik  
Universitas Islam Sultan Agung Semarang



**Muhamad Rusli Ahyar, ST., M. Eng**  
NIDN. 0625059102

## BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR

No : 36/A.2/SA-T/VIII/2025

Pada hari ini tanggal, 28 Agustus 2025.....berdasarkan surat keputusan Dekan Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung Semarang perihal penunjukan Dosen Pembimbing Utama, diantaranya :

1. Nama : Dr. Abdul Rochim, ST., MT  
Jabatan Akademik : Lektor Kepala  
Jabatan : Dosen Pembimbing

Dengan ini menyatakan bahwa mahasiswa yang tersebut dibawah ini telah menyelesaikan bimbingan Tugas Akhir:

Rekhan Farras Sutrisno  
NIM. 30202100178

Riko Bagus Setiyawan  
NIM. 30202100183

Berjudul : Analisis Stabilitas Bendungan Terhadap Rembesan dan *Piping* (Studi Kasus Bendungan Jragung Kabupaten Semarang), dengan tahapan sebagai berikut:

| No | Tahapan                     | Tanggal    | Keterangan |
|----|-----------------------------|------------|------------|
| 1  | Penunjukan dosen pembimbing | 14/04/2025 | -          |
| 2  | Seminar proposal            | 22/07/2025 | ACC        |
| 3  | Pengumpulan data            | 22/05/2025 | -          |
| 4  | Analisis data               | 23/07/2025 | -          |
| 5  | Penyusunan laporan          | 10/07/2025 | -          |
| 6  | Selesai laporan             | 26/08/2025 | ACC        |

Demikian Berita Acara Bimbingan Tugas Akhir / Skripsi ini dibuat untuk diketahui dan dipergunakan seperlunya oleh pihak-pihak yang berkepentingan.

Pembimbing Utama

  
Dr. Abdul Rochim, ST., MT  
NIDN. 0608067601

Mengetahui,  
Ketua Program Studi Teknik Sipil

  
Muhamad Rusli Alhyar, ST., M. Eng  
NIDN. 0625059102

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Kami yang bertanda tangan dibawah ini:

1. Nama : Rekhan Farras Sutrisno  
NIM : 30202100178
2. Nama : Riko Bagus Setiyawan  
NIM : 30202100183

Dengan ini kami menyatakan bahwa Tugas Akhir yang berjudul :

**“Analisis Stabilitas Bendungan Terhadap Rembesan dan *Piping* (Studi Kasus Bendungan Jragung Kabupaten Semarang)”**.

Benar bebas dari plagiasi, dan apabila pernyataan ini terbukti tidak benar maka kami bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini kami buat untuk dipergunakan sebagaimana semestinya.

Mahasiswa 1

Rekhan Farras Sutrisno  
NIM. 30202100178

Semarang, Agustus 2025  
Yang membuat pernyataan,  
Mahasiswa 2



Riko Bagus Setiyawan  
NIM. 30202100183

## PERNYATAAN KEASLIAN

Kami yang bertanda tangan dibawah ini :

1. Nama : Rekhan Farras Sutrisno  
NIM : 30202100178
2. Nama : Riko Bagus Setiyawan  
NIM : 30202100183

Dengan ini kami menyatakan bahwa Tugas Akhir yang berjudul :

**“Analisis Stabilitas Bendungan Terhadap Rembesan dan *Piping* (Studi Kasus Bendungan Jragung Kabupaten Semarang)”**.

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Tugas Akhir ini merupakan hasil penelitian, pemikiran, dan pemaparan asli kami sendiri. Kami tidak mencantumkan tanpa pengakuan bahan-bahan yang telah dipublikasikan sebelumnya atau ditulis oleh orang lain, atau sebagai bahan yang pernah diajukan untuk gelar atau ijazah pada Universitas Islam Sultan Agung Semarang atau perguruan tinggi lainnya.

Apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka kami bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Demikian surat pernyataan ini kami buat untuk dipergunakan sebagaimana semestinya.

Mahasiswa 1

Rekhan Farras Sutrisno  
NIM. 30202100178



Semarang, Agustus 2025  
Yang membuat pernyataan,  
Mahasiswa 2

Riko Bagus Setiyawan  
NIM. 30202100183

## MOTTO

“Kamu (umat Islam) adalah umat terbaik yang dilahirkan untuk manusia (selama) kamu menyuruh (berbuat) yang makruf, mencegah dari yang mungkar, dan beriman kepada Allah. Seandainya Ahlul kitab beriman, tentulah itu lebih baik bagi mereka. Di antara mereka ada yang beriman dan kebanyakan mereka adalah orang-orang fasik”

(Q.S Ali ‘Imran Ayat 110)

“Berjalan di antara rasio dan perasaan, menjadikan manusia menemukan jati dirinya sendiri.”

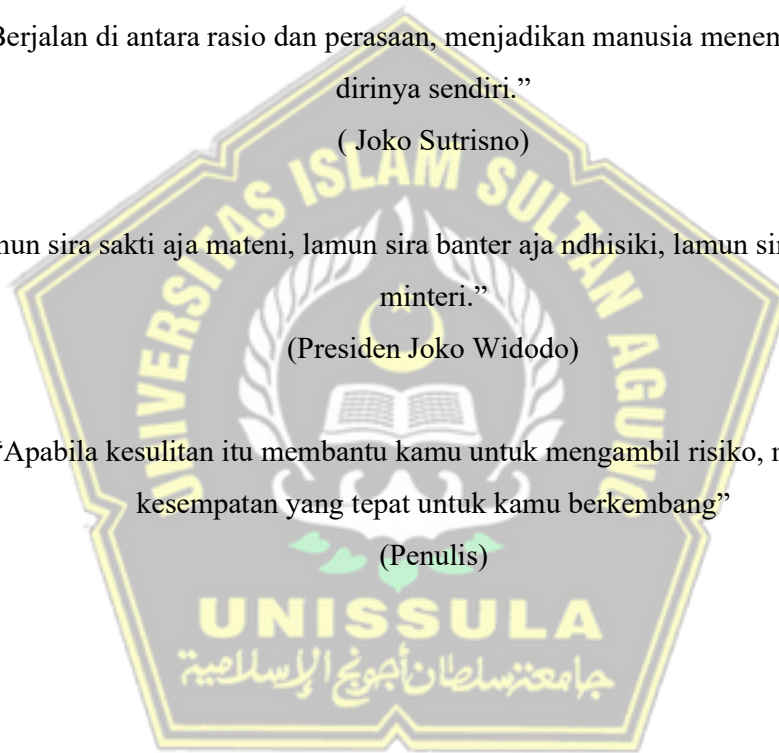
(Joko Sutrisno)

“Lamun sira sakti aja mateni, lamun sira banter aja ndhisiki, lamun siro pinter ojo minteri.”

(Presiden Joko Widodo)

“Apabila kesulitan itu membantu kamu untuk mengambil risiko, maka itu kesempatan yang tepat untuk kamu berkembang”

(Penulis)



## PERSEMBAHAN

Allahamdullilah, Segala puji bagi Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Analisis Stabilitas Bendungan Terhadap Rembesan dan Piping (Studi Kasus Bendungan Jragung Kabupaten Semarang)**. Penelitian ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan dukungan dari banyak pihak dan untuk itu dengan segala kerendahan hati penulis ucapkan banyak terimakasih, terutama kepada :

1. Keluarga dan kedua orang tua saya, Bapak Joko Sutrisno dan Ibu Muchrimah Yulaicha G, serta kakak saya Azzahra Nafisah Kaliswati yang sudah memberikan semangat, motivasi, dukungan materil, pendidikan mental, doa setiap langkah yang saya lewati, serta selalu menjadi alasan untuk meraih kesuksesan dan menjadi sebaik-baiknya *birul walidain*.
2. Bapak Dr. Abdul Rochim ST., MT selaku dosen pembimbing saya atas segala doa, waktu, bimbingan, dan bantuan selama menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Ibu Civitas dan Akademik Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang, yang telah memberikan saya kesempatan untuk mengemban ilmu dan memberikan kesempatan berkembang dimasa perkuliahan ini.
4. Patner saya Riko Bagus Setiyawan yang telah berjuang, bekerjasama layaknya team dalam menyusun Tugas Akhir ini.
5. Teman-teman KMFT Angkatan 2021 yang telah memberikan keakraban, kesenangan, pertemanan baru.
6. Organisasi Mahasiswa Senat Mahasiswa Fakultas Teknik yang telah memberikan pengalaman serta menjadi ruang menuangkan pikiran pikiran baru, dan memeberikan kesempatan mengembangkan wawasan, keterampilan komunikasi hingga pemahaman dinamika yang terjadi selama 3 tahun ini.

7. Seluruh pengurus SEMA-FT Parlemen “Kelak Sinergi” yang telah kebersamai dan memberikan banyak kesan kepada saya selama menjadi Ketua SEMA-FT 2024/2025.

Rekhan Farras Sutrisno



## PERSEMBAHAN

Allahamdullilah, Segala puji bagi Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Analisis Stabilitas Bendungan Terhadap Rembesan dan Piping (Studi Kasus Bendungan Jragung Kabupaten Semarang)**. Penelitian ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan dukungan dari banyak pihak dan untuk itu dengan segala kerendahan hati penulis ucapkan banyak terimakasih, terutama kepada :

1. Keluarga dan kedua orang tua saya, Bapak Marbi dan Ibu Khusnul Khotimah, serta adik saya Umi Khulsum yang sudah memberikan semangat, motivasi, dukungan materil, pendidikan mental, doa setiap langkah yang saya lewati, serta selalu menjadi alasan untuk meraih kesuksesan dan menjadi sebaik-baiknya *birul walidain*.
2. Bapak Dr. Abdul Rochim ST., MT selaku dosen pembimbing saya atas segala doa, waktu, bimbingan, dan bantuan selama menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Ibu Civitas dan Akademik Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang, yang telah memberikan saya kesempatan untuk mengemban ilmu dan memberikan kesempatan berkembang dimasa perkuliahan ini.
4. Seluruh staf karyawan Supervisi Bendungan Jragung, yang memberikan fasilitas dan kesempatan untuk mengembangkan ilmu penelitian.
5. Bapak Ahmad Hidayawan ST., MT dan Bapak Dwi Arif W., ST selaku mentor dan juga sebagai pembimbing lapangan pada penelitian ini.
6. Patner saya Re Khan Farras Sutrisno yang telah berjuang, bekerjasama layaknya team dalam menyusun Tugas Akhir ini.
7. Teman-teman angkatan 2021 Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

8. Teman-teman Ormawa-BSO Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang, yang mana salah satu tempat berkembang mencari pengalaman dan hal baru selama masa kuliah.
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

Riko Bagus Setiyawan



## KATA PENGANTAR

Allahamdullilah, Segala puji bagi Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Analisis Stabilitas Bendungan Terhadap Rembesan dan Piping (Studi Kasus Bendungan Jragung Kabupaten Semarang)**. Penelitian ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Allhamdulillah Tugas Akhir dapat diselesaikan dengan dukungan dari banyak pihak dan untuk itu dengan segala kerendahan hati penulis ucapkan banyak terimakasih, terutama kepada :

1. Bapak Dr. Abdul Rochim ST., MT selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Bapak Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Bapak Dr. Abdul Rochim ST., MT selaku dosen pembimbing yang telah saya atas segala doa, waktu, bimbingan, dan bantuan selama menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Ibu Civitas dan Akademik Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
5. Orang tua serta keluarga besar atas segala dukungan dan selalu menjadi alasan untuk meraih kesuksesan dan menjadi sebaik-baiknya *birul walidain*.
6. Seluruh staf karyawan Konsultan Supervisi Bendungan Jragung, yang memberikan fasilitas dan kesempatan untuk mengembangkan ilmu penelitian.
7. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari kelemahan, keterbatasan dan masih jauh dari sempurna dalam Tugas Akhir ini oleh karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun dari pembaca demi kesempurnaan Tugas Akhir yang akan datang.

Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan menjadikan tambahan referensi bagi pihak-pihak yang memerlukan.

Semarang, Agustus 2025  
Penulis



## DAFTAR ISI

|                                                |              |
|------------------------------------------------|--------------|
| <b>TUGAS AKHIR .....</b>                       | <b>i</b>     |
| <b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>                 | <b>ii</b>    |
| <b>USULAN PROPOSAL TUGAS AKHIR .....</b>       | <b>iii</b>   |
| <b>BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR.....</b> | <b>iv</b>    |
| <b>PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI .....</b>         | <b>v</b>     |
| <b>PERNYATAAN KEASLIAN.....</b>                | <b>vi</b>    |
| <b>MOTTO .....</b>                             | <b>vii</b>   |
| <b>PERSEMBAHAN.....</b>                        | <b>viii</b>  |
| <b>PERSEMBAHAN.....</b>                        | <b>x</b>     |
| <b>KATA PENGANTAR.....</b>                     | <b>xii</b>   |
| <b>DAFTAR ISI.....</b>                         | <b>xiv</b>   |
| <b>DAFTAR TABEL .....</b>                      | <b>xviii</b> |
| <b>DAFTAR GAMBAR.....</b>                      | <b>xx</b>    |
| <b>ABSTRAK .....</b>                           | <b>xxiii</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>                          | <b>xxiv</b>  |
| <b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>                  | <b>1</b>     |
| 1.1    Latar Belakang .....                    | 1            |
| 1.2    Rumusan Masalah .....                   | 2            |
| 1.3    Maksud dan Tujuan .....                 | 3            |
| 1.4    Batasan Masalah .....                   | 3            |
| 1.5    Sistematika Penulisan.....              | 4            |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>            | <b>5</b>     |
| 2.1    Bendungan.....                          | 5            |
| 2.1.1    Jenis-jenis Bendungan.....            | 5            |

|       |                                                          |    |
|-------|----------------------------------------------------------|----|
| 2.1.2 | Bendungan Urugan.....                                    | 7  |
| 2.1.3 | Klasifikasi Bendungan Urugan .....                       | 7  |
| 2.2   | Geologi Bendungan .....                                  | 10 |
| 2.2.1 | Geologi Regional .....                                   | 10 |
| 2.3   | Tanah .....                                              | 12 |
| 2.3.1 | Klasifikasi Tanah .....                                  | 12 |
| 2.3.2 | Sistem Klasifikasi Unified .....                         | 13 |
| 2.3.3 | Data Pengambilan Tanah .....                             | 16 |
| 2.3.4 | Parameter Tanah.....                                     | 19 |
| 2.4   | Rembesan Bendungan .....                                 | 21 |
| 2.4.1 | Umum.....                                                | 21 |
| 2.4.2 | Hukum Darcy .....                                        | 23 |
| 2.4.3 | Rembesan Pada Tubuh Bendungan.....                       | 24 |
| 2.4.4 | Kegagalan Akibat Rembesan .....                          | 28 |
| 2.5   | Pemasangan Pengendalian Rembesan Tambahan .....          | 29 |
| 2.5.1 | <i>Grouting</i> .....                                    | 29 |
| 2.5.2 | <i>Cut off wall</i> .....                                | 32 |
| 2.6   | Beban Gempa .....                                        | 34 |
| 2.6.1 | Umum.....                                                | 34 |
| 2.6.2 | Jenis-Jenis Gempa.....                                   | 34 |
| 2.6.3 | Tingkat Risiko Bendungan.....                            | 34 |
| 2.6.4 | Analisis Koefisien Gempa.....                            | 37 |
| 2.7   | Stabilitas Bendungan.....                                | 39 |
| 2.7.1 | Umum.....                                                | 39 |
| 2.7.2 | Metode Morgenstern-Pricee.....                           | 39 |
| 2.7.3 | Kriteria Nilai Faktor Keamanan Stabilitas Bendungan..... | 41 |

|                                            |                                                       |           |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------|
| 2.8                                        | Analisa Rembesan .....                                | 42        |
| 2.8.1                                      | Metode Analisa .....                                  | 42        |
| 2.8.2                                      | Pemodelan <i>Finite Element</i> .....                 | 44        |
| 2.9                                        | Penelitian Terdahulu.....                             | 45        |
| <b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b> |                                                       | <b>50</b> |
| 3.1                                        | Lokasi Penelitian .....                               | 50        |
| 3.2                                        | Alat dan Bahan .....                                  | 50        |
| 3.3                                        | Keperluan Data .....                                  | 50        |
| 3.3.1                                      | Data Primer .....                                     | 51        |
| 3.3.2                                      | Data Sekunder .....                                   | 51        |
| 3.4                                        | Metode Pengumpulan Data .....                         | 56        |
| 3.5                                        | Analisis Data .....                                   | 56        |
| 3.6                                        | Tahapan Penelitian .....                              | 57        |
| 3.6.1                                      | Langkah-langkah Pemodelan SEEP/W .....                | 57        |
| 3.6.2                                      | Langkah-langkah Permodelan SLOPE/W .....              | 58        |
| 3.6.3                                      | Analisa.....                                          | 59        |
| 3.7                                        | Bagan Alir Penelitian .....                           | 60        |
| <b>BAB IV HASIL PENELITIAN.....</b>        |                                                       | <b>62</b> |
| 4.1                                        | Kriteria Beban Gempa.....                             | 62        |
| 4.2                                        | Koefisien Gempa Termodifikasi .....                   | 63        |
| 4.2.1                                      | Gempa OBE ( <i>Operating basis earthquake</i> ) ..... | 63        |
| 4.2.2                                      | Gempa MDE ( <i>Maximum design earthquake</i> ) .....  | 65        |
| 4.3                                        | Analisis Pemodelan .....                              | 67        |
| 4.3.1                                      | Analisis <i>Safety Of Factor</i> .....                | 67        |
| 4.3.2                                      | Analisis Simulasi Rembesan .....                      | 73        |
| 4.3.3                                      | <i>Stagging Analysis</i> .....                        | 79        |

|                             |                                                                                   |            |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4                         | Hasil Analisis Stabilitas.....                                                    | 80         |
| 4.4.1                       | Kondisi MAN Tanpa Beban Gempa .....                                               | 80         |
| 4.4.2                       | Kondisi MAN Dengan Beban Gempa OBE .....                                          | 82         |
| 4.4.3                       | Kondisi MAN Dengan Beban Gempa MDE.....                                           | 86         |
| 4.5                         | Hasil Analisis Keamanan Terhadap Rembesan.....                                    | 89         |
| 4.5.1                       | Eksisting (Tanpa Pengendalian Tambahan).....                                      | 90         |
| 4.5.2                       | Alternatif 1 (Dengan Pengendalian <i>Curtain Grouting</i> ) .....                 | 91         |
| 4.5.3                       | Alternatif 2 (Dengan Pengendalian <i>Cut Off Wall</i> ) .....                     | 93         |
| 4.6                         | Hasil Analisis Keamanan Terhadap <i>Piping</i> .....                              | 95         |
| 4.6.1                       | Eksisting (Tanpa Pengendalian Tambahan).....                                      | 95         |
| 4.6.2                       | Alternatif 1 (Dengan Pengendalian <i>Curtain Grouting</i> ) .....                 | 96         |
| 4.6.3                       | Alternatif 2 (Dengan Pengendalian <i>Cut Off Wall</i> ) .....                     | 97         |
| 4.7                         | Rekapitulasi <i>Safety of Factor</i> Stabilitas, Rembesan dan <i>Piping</i> ..... | 97         |
| 4.7.1                       | Stabilitas.....                                                                   | 98         |
| 4.7.2                       | Rembesan .....                                                                    | 99         |
| 4.7.3                       | <i>Piping</i> .....                                                               | 100        |
| <b>BAB V</b>                | <b>KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>                                                  | <b>101</b> |
| 5.1                         | Kesimpulan.....                                                                   | 101        |
| 5.2                         | Saran.....                                                                        | 101        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b> |                                                                                   | <b>102</b> |

## DAFTAR TABEL

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2. 1 Ukuran Butiran.....                                                            | 13 |
| Tabel 2. 2 Simbol-simbol klasifikasi tanah dalam sistem Unified.....                      | 14 |
| Tabel 2. 3 Klasifikasi Tanah Menurut USCS.....                                            | 15 |
| Tabel 2. 4 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Ukuran Butiran(ASTM).....                        | 17 |
| Tabel 2. 5 Besaran Sudut Geser Dalam Tanah .....                                          | 21 |
| Tabel 2. 6 Karakteristik Material Untuk <i>Cut off Wall</i> , ICOLD (2005) .....          | 33 |
| Tabel 2. 7 Kriteria Faktor Risiko Untuk Evaluasi Keamanan Bendungan .....                 | 35 |
| Tabel 2. 8 Kelas Risiko Bendungan Dan Bangunan Airr. ....                                 | 36 |
| Tabel 2. 9 Kriteria Beban Gempa untuk Desain Bendungan .....                              | 36 |
| Tabel 2. 10 Prosedur Analisis yang Dianjurkan untuk Bendungan Tipe Urugann.....           | 36 |
| Tabel 2. 11 Kriteria Faktor Keamanan Minimum untuk Stabilitas Bendungan Tipe Urugann..... | 41 |
| Tabel 2. 12 Petunjuk Penggunaan Beberapa Metode Analisa Rembesan.....                     | 43 |
| Tabel 2. 13 Penelitian Terdahulu .....                                                    | 46 |
| Tabel 3. 1 Parameter Timbunan.....                                                        | 55 |
| Tabel 4. 1 Bobot Faktor Risiko Bendungan.....                                             | 62 |
| Tabel 4. 2 Kelas Risiko0 .....                                                            | 62 |
| Tabel 4. 3 Kriteria Beban Gempa untuk Desain Bendungan. ....                              | 63 |
| Tabel 4. 4 Resume Hasil Nilai Koefisien Beban Gempa OBE.....                              | 65 |
| Tabel 4. 5 Resume Hasil Nilai Koefisien Beban Gempa MDE. ....                             | 67 |
| Tabel 4. 6 <i>Stagging Analysis</i> .....                                                 | 79 |
| Tabel 4. 7 Syarat Faktor Keamanan Minimum.....                                            | 80 |
| Tabel 4. 8 Rangkuman Nilai <i>Factor of Safety</i> Tanpa Gempa .....                      | 82 |
| Tabel 4. 9 Nilai Koefisien Termodifikasi Beban Gempa OBE.....                             | 83 |
| Tabel 4. 10 Rangkuman Nilai <i>Factor of Safety</i> Eksisting Gempa OBE .....             | 84 |
| Tabel 4. 11 Rangkuman Nilai <i>Factor of Safety</i> Alternatif 1 Gempa OBE .....          | 85 |
| Tabel 4. 12 Rangkuman Nilai <i>Factor of Safety</i> Alternatif 2 Gempa OBE .....          | 86 |
| Tabel 4. 13 Nilai Koefisien Termodifikasi Beban Gempa MDE.....                            | 86 |
| Tabel 4. 14 Rangkuman Nilai <i>Factor of Safety</i> Eksisting Gempa MDE .....             | 87 |
| Tabel 4. 15 Rangkuman Nilai <i>Factor of Safety</i> Alternatif 1 Gempa MDE.....           | 88 |

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabel 4. 16 Rangkuman Nilai <i>Factor of Safety</i> Alternatif 2 Gempa MDE.....     | 89  |
| Tabel 4. 17 Rekapitulasi Stabilitas <i>Safety of Factor</i> .....                   | 98  |
| Tabel 4. 18 Rekapitulasi Nilai <i>Safety of Factor</i> Rembesan .....               | 99  |
| Tabel 4. 19 Rekapitulasi Nilai <i>Safety of Factor</i> terhadap <i>Piping</i> ..... | 100 |



## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2. 1 Potongan Melintang Bendungan Urugan Homogen .....                                      | 8  |
| Gambar 2. 2 Potongan Melintang Bendungan Urugan Zonal.....                                         | 8  |
| Gambar 2. 3 Potongan Melintang Bendungan Urugan Sekat .....                                        | 9  |
| Gambar 2. 4 Klasifikasi Bendungan Urugan .....                                                     | 9  |
| Gambar 2. 5 Peta Geologi Regional Lembar Salatiga, Jawa (Sukardi dan T.<br>Budhitrisna, 1992)..... | 11 |
| Gambar 2. 6 Peta Struktur Geologi Jawa Tengah, 2003 .....                                          | 12 |
| Gambar 2. 7 Erosi Internal dan <i>Piping</i> pada Tubuh Bendungan dan Fondasi.....                 | 23 |
| Gambar 2. 8 Profil Memanjang sebuah Bendungan Tipe Urugan .....                                    | 27 |
| Gambar 2. 9 Ilustrasi Terjadinya <i>Piping</i> , P3 SDA dan Konstruksi (2008).....                 | 27 |
| Gambar 2. 10 Sistem Pencegahan Kebocoran Pada Bendungan Urugan .....                               | 31 |
| Gambar 2. 11 Penempatan Lubang-lubang Sementasi .....                                              | 31 |
| Gambar 2. 12 Pola Lubang <i>Grouting</i> Konsolidasi.....                                          | 32 |
| Gambar 2. 13 Gaya Pada Irisan Metode Morgenstern-Pricee .....                                      | 41 |
| Gambar 2. 14 Beberapa Metode Analisa Rembesann.....                                                | 43 |
| Gambar 3. 1 Peta Lokasi Penelitian .....                                                           | 50 |
| Gambar 3. 2.Peta Geologi Bendungan Jragung .....                                                   | 54 |
| Gambar 3. 3.Peta Geologi Tapak Bendungan.....                                                      | 55 |
| Gambar 3. 4.Penampang Memanjang Geologi Pondasi Bendungan Utama.....                               | 55 |
| Gambar 3. 5 Gambar Potongan Melintang STA + 700.....                                               | 56 |
| Gambar 3. 6 Diagram Alir Penelitian .....                                                          | 60 |
| Gambar 3. 7 Diagram Alir Analisis Rembesan.....                                                    | 61 |
| Gambar 3. 8 Diagram Alir Analisis Stabilitas .....                                                 | 61 |
| Gambar 4. 1 Peta Percepatan Puncak dibatuan Dasar (SB) Periode Ulang 100<br>thn.....               | 63 |
| Gambar 4. 2 Peta Percepatan Puncak dibatuan Dasar (SB) Periode Ulang 10.000<br>thn.....            | 65 |
| Gambar 4. 3 Menu <i>DefineProject</i> .....                                                        | 68 |
| Gambar 4. 4 <i>Define Project Settings</i> .....                                                   | 68 |
| Gambar 4. 5 Pengaturan Skala dan Units.....                                                        | 69 |

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 4. 6 CAD .dwg.....                                            | 69 |
| Gambar 4. 7 <i>Import Geometri</i> .....                             | 69 |
| Gambar 4. 8 Sketsa Polyline pada <i>Software</i> .....               | 70 |
| Gambar 4. 9 <i>Define Materials</i> .....                            | 70 |
| Gambar 4. 10 Setelah <i>Input Material</i> .....                     | 71 |
| Gambar 4. 11 <i>Draw Slip Surface Grid and Radius</i> .....          | 71 |
| Gambar 4. 12 <i>Draw Slip Surface Limits</i> .....                   | 72 |
| Gambar 4. 13 <i>Seismic Load</i> .....                               | 72 |
| Gambar 4. 14 <i>Solve Manager SLOPE/W</i> .....                      | 73 |
| Gambar 4. 15 <i>Define Project SEEP/W</i> .....                      | 73 |
| Gambar 4. 16 Pengaturan Skala dan <i>Units</i> .....                 | 74 |
| Gambar 4. 17 Gambar CAD .dwg.....                                    | 74 |
| Gambar 4. 18 Gambar Polyline pada <i>Software</i> .....              | 75 |
| Gambar 4. 19 <i>Define Materials</i> .....                           | 75 |
| Gambar 4. 20 <i>Saturated Only</i> .....                             | 76 |
| Gambar 4. 21 <i>Saturated / Unsaturated</i> .....                    | 76 |
| Gambar 4. 22 <i>Define Vol. Water Content Functions</i> .....        | 77 |
| Gambar 4. 23 <i>Define Hyd. Conductivity Functions</i> .....         | 77 |
| Gambar 4. 24 Setelah <i>Input Material</i> .....                     | 78 |
| Gambar 4. 25 <i>Define Boundary Conductivity</i> .....               | 78 |
| Gambar 4. 26 Setelah <i>Input Boundary</i> .....                     | 79 |
| Gambar 4. 27 <i>Solve Manager SEEP/W</i> .....                       | 79 |
| Gambar 4. 28 <i>Upstream Eksisting Tanpa Gempa</i> .....             | 80 |
| Gambar 4. 29 <i>Downstream Eksisting Tanpa Gempa</i> .....           | 81 |
| Gambar 4. 30 <i>Upstream Alternatif 1 Tanpa Gempa</i> .....          | 81 |
| Gambar 4. 31 <i>Downstream Alternatif 1 Tanpa Gempa</i> .....        | 81 |
| Gambar 4. 32 <i>Upstream Alternatif 2 Tanpa Gempa</i> .....          | 82 |
| Gambar 4. 33 <i>Downstream Alternatif 2 Tanpa Gempa</i> .....        | 82 |
| Gambar 4. 34 <i>Upstream Eksisting Gempa OBE 0,25 Y/H</i> .....      | 83 |
| Gambar 4. 35 <i>Downstream Eksisting Gempa OBE 0,25 Y/H</i> .....    | 83 |
| Gambar 4. 36 <i>Upstream Alternatif 1 Gempa OBE 0,25 Y/H</i> .....   | 84 |
| Gambar 4. 37 <i>Downstream Alternatif 1 Gempa OBE 0,25 Y/H</i> ..... | 84 |

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 4. 38 <i>Upstream</i> Alternatif 2 Gempa OBE 0,25 Y/H .....                                                     | 85 |
| Gambar 4. 39 <i>Downstream</i> Alternatif 2 Gempa OBE 0,25 Y/H .....                                                   | 85 |
| Gambar 4. 40 <i>Upstream</i> Eksisting Gempa MDE 0,25 Y/H .....                                                        | 86 |
| Gambar 4. 41 <i>Downstream</i> Eksisting Gempa MDE 0,25 Y/H .....                                                      | 87 |
| Gambar 4. 42 <i>Upstream</i> Alternatif 1 Gempa MDE 0,25 Y/H .....                                                     | 87 |
| Gambar 4. 43 <i>Downstream</i> Alternatif 1 Gempa MDE 0,25 Y/H .....                                                   | 88 |
| Gambar 4. 44 <i>Upstream</i> Alternatif 2 Gempa MDE 0,25 Y/H .....                                                     | 88 |
| Gambar 4. 45 <i>Downstream</i> Alternatif 2 Gempa MDE 0,25 Y/H .....                                                   | 89 |
| Gambar 4. 46 <i>Contour Pore Water Pressure</i> Eksisiting Kondisi <i>Steady-State</i> Muka<br>Air Normal .....        | 90 |
| Gambar 4. 47 <i>Contour Water Total Head</i> Pada Eksisting Kondisi <i>Steady-State</i><br>MukaaAir Normal .....       | 90 |
| Gambar 4. 48 Besaran Debit RembesannEksisting MukaaAir Normal .....                                                    | 91 |
| Gambar 4. 49 <i>Contour Pore Water Pressure</i> Pada Alternatif 1 Kondisi <i>Steady-State</i><br>Muka Air Normal ..... | 92 |
| Gambar 4. 50 <i>Contour Water Total Head</i> Pada Alternatif 1 Kondisi <i>Steady-State</i><br>Muka Air Normal .....    | 92 |
| Gambar 4. 51 Besaran Debit Rembesan Alternatif 1 Muka Air Normal .....                                                 | 92 |
| Gambar 4. 52 <i>Contour Pore Water Pressure</i> Alternatif 1 Kondisi <i>Steady-State</i><br>Muka Air Normal .....      | 93 |
| Gambar 4. 53 <i>Contour Water Total Head</i> Alternatif 1 Kondisi <i>Steady-State</i> Muka<br>Air Normal .....         | 94 |
| Gambar 4. 54 Besaran DebittRembesan Alternatif 2 Muka Air Normal .....                                                 | 94 |
| Gambar 4. 55 Gradien Hidrolik Eksisting Kondisi Muka Air Normal .....                                                  | 95 |
| Gambar 4. 56 Gradien Hidrolik Alternatif 1 Kondisi Muka Air Normal .....                                               | 96 |
| Gambar 4. 57 Gradien Hidrolik Alternatif 2 Kondisi Muka Air Normal .....                                               | 97 |

**ANALISIS KESTABILAN BENDUNGAN TERHADAP  
REMBESAN DAN *PIPING*  
(STUDI KASUS BENDUNGAN JRAGUNG KABUPATEN SEMARANG)**

**ABSTRAK**

Pondasi bendungan menjadi struktur dasar yang memenuhi persyaratan sebagai sektor pendukung pembangunan bendungan serta memastikan keamanan terhadap salah satu ancaman serius berupa rembesan (*seepage*) dan *piping*. Oleh karena itu, menganalisis stabilitas bendungan terhadap rembesan dan *piping* perlu dilakukan.

Penelitian ini menggunakan program *Finite Element* untuk menganalisis stabilitas, rembesan, dan *piping* pada kondisi *Normal Water Level*. Analisis stabilitas bendungan dilakukan dengan menambahkan faktor koefisien beban gempa OBE (*Operating Basis Earthquake*) dan MDE (*Maximum Design Earthquake*). Analisis dilakukan dalam dua tahap, yaitu tahap pertama tanpa perbaikan tambahan dan tahap kedua dengan perbaikan tambahan berupa *Curtain Grouting* dan *Cut Off Wall*.

Pada kondisi *Normal Water Level* tanpa gempa maupun dengan gempa OBE dan MDE 1,00H, stabilitas pondasi pada kondisi Eksisting, Alternatif 1, dan Alternatif 2 memenuhi kriteria, namun tidak memenuhi pada gempa MDE 0,25H, 0,50H, dan 0,75H sehingga diperlukan analisis dinamis menggunakan metode Makdisi-Seed. Analisis rembesan menunjukkan bahwa debit pada kondisi Eksisting sebesar 49.716,74 m<sup>3</sup>/hari melebihi batas izin 45.000 m<sup>3</sup>/hari, sedangkan pada Alternatif 1 (255,13 m<sup>3</sup>/hari) dan Alternatif 2 (238,55 m<sup>3</sup>/hari) memenuhi kriteria. Sementara itu, analisis *piping* pada kondisi *Normal Water Level* menunjukkan bahwa Eksisting tidak memenuhi *Safety Factor*, sedangkan Alternatif 1 dan Alternatif 2 memenuhi kriteria dan aman terhadap *piping*.

**Kata Kunci:** *Stabilitas; Rembesan; Piping; Curtain Grouting; Koefisien Beban Gempa*

## ***ANALYSIS OF DAM STABILITY AGAINST SEEPAGE AND PIPING (CASE STUDY OF JRAGUNG DAM, SEMARANG REGENCY)***

### ***ABSTRACT***

*Dam foundations are the basic structure that meets the requirements for supporting dam construction and ensures safety against serious threats such as seepage and piping. Therefore, analyzing the dam's stability against seepage and piping is necessary.*

*This study utilized a Finite Element program to analyze stability, seepage, and piping under Normal Water Level conditions. The dam stability analysis was conducted by incorporating earthquake load coefficient factors for OBE (Operating Basis Earthquake) and MDE (Maximum Design Earthquake). The analysis was carried out in two stages: the first stage without additional remedial measures, and the second stage with additional measures in the form of Curtain Grouting and a Cut-Off Wall.*

*Under Normal Water Level conditions, both without earthquake loads and with OBE and MDE 1.00H loads, the foundation stability for the Existing condition, Alternative 1, and Alternative 2 met the criteria. However, under MDE 0.25H, 0.50H, and 0.75H loads, all conditions failed to meet the requirements, indicating the need for further dynamic analysis using the Makdisi-Seed method. Seepage analysis showed that the discharge for the Existing condition was 49,716.74 m<sup>3</sup>/day, exceeding the allowable limit of 45,000 m<sup>3</sup>/day, while Alternative 1 (255.13 m<sup>3</sup>/day) and Alternative 2 (238.55 m<sup>3</sup>/day) met the criteria. Meanwhile, the piping analysis under Normal Water Level conditions indicated that the Existing condition did not meet the Safety Factor, whereas Alternative 1 and Alternative 2 met the criteria and were deemed safe against Piping.*

***Keywords:*** *Stability; Seepage; Piping; Curtain Grouting; Earthquake Load Coefficient*

## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Kegagalan pada bendungan dapat menimbulkan dampak yang sangat merugikan, baik secara ekonomi, lingkungan, maupun keselamatan manusia. Salah satu peristiwa yang pernah terjadi adalah jebolnya Bendungan Situ Gintung di Tangerang Selatan pada tahun 2009, yang mengakibatkan lebih dari 100 orang meninggal dunia serta menghancurkan permukiman warga di sekitarnya (Kompas, 2009). Peristiwa ini terjadi akibat sejumlah faktor seperti rembesan air yang tidak terkendali, penurunan daya dukung tanah, dan lemahnya sistem pemantauan serta perawatan infrastruktur. Kejadian tersebut menegaskan pentingnya melakukan kajian stabilitas bendungan secara menyeluruh, khususnya terhadap potensi rembesan dan gejala *piping* yang berisiko mengganggu kestabilan struktur bendungan (BNPB, 2010).

Pembangunan infrastruktur sumber daya air merupakan upaya peningkatan komponen vital dalam mendukung pembangunan yang berkelanjutan guna mewujudkan kesejahteraan masyarakat, salah satunya berupa pembangunan bendungan. Bendungan tidak hanya berfungsi sebagai penampung air, tetapi juga infrastruktur vital dalam mendukung ketahanan pangan disektor pertanian melalui irigasi, menyediakan air baku, hingga menjadi sumber energi melalui pembangkit listrik. Pondasi bendungan sebagai struktur dasar yang memenuhi persyaratan untuk mendukung beban bendungan, menahan tekanan air, serta memastikan keamanan terhadap salah satu ancaman serius berupa rembesan (*seepage*) dan *piping*.

Fenomena rembesan dan *piping* ini dapat memicu kerusakan struktural yang berujung pada kegagalan bendungan, yang berdampak besar bagi keselamatan masyarakat dan kerugian ekonomi yang signifikan. Rembesan merupakan aliran air yang bergerak melalui pori-pori material bendungan atau pondasi akibat adanya perbedaan tekanan air. Sementara itu, *piping* merupakan proses erosi internal dimana air mengalir melalui celah atau pori tanah dengan kecepatan tinggi dan

membawa partikel tanah keluar dari struktur bendungan, membentuk rongga yang dapat menyebabkan keruntuhan secara tiba-tiba.

Penelitian ini akan menganalisis stabilitas terhadap rembesan dan *piping* pada Bendungan Jragung yang berlokasi di Dusun Kedung Glatik, Desa Candirejo, Kecamatan Pringapus, Kabupaten Semarang. Bendungan Jragung merupakan salah satu proyek strategis Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat dalam rangka mendukung ketahanan pangan serta ketersediaan air di Jawa Tengah, yang pelaksanaannya dilakukan oleh BBWS Pemali–Juana (PU, 2025). Infrastruktur ini bersifat multifungsi dengan kapasitas tampungan mencapai 90 juta m<sup>3</sup> dan area genangan sekitar 451 *hektare*. Fungsi utamanya adalah menyediakan pasokan air irigasi untuk lahan pertanian seluas 4.528 *hektare* di Kabupaten Demak dan Grobogan. Selain itu, bendungan ini juga direncanakan menjadi sumber air baku sebesar 1.000 liter per detik bagi Kota Semarang, Kabupaten Grobogan, dan Demak. Manfaat tambahan yang diharapkan meliputi pengendalian banjir pada kawasan seluas 880 *hektare*, pemanfaatan energi surya dengan kapasitas 90 MW, serta pembangunan PLTMH berkapasitas 1,4 MW.

Dengan kondisi studi diatas dan banyaknya tujuan dari pembangunan Bendungan Jragung, maka perencanaan teknis yang mendetail perlu dilakukan guna memastikan keamanan bendungan terhadap ancaman rembesan dan *piping*. Penelitian ini akan menganalisis stabilitas bendungan terhadap rembesan dan *piping*, dengan program berbasis metode *Finite Element* yang mampu melakukan pemodelan stabilitas dan aliran rembesan guna memperoleh hasil yang lebih akurat.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas yang menjadi topik utama dalam Tugas Akhir ini, adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana potensi kestabilan bendungan tanpa pengendalian struktur terhadap kondisi keamanan rembesan dan *piping* ?
2. Bagaimana permodelan *curtain grouting* dan *Cut off wall* sebagai pengendalian struktur terhadap rembesan dan *piping*?

3. Bagaimana perbandingan stabilitas bendungan setelah pemasangan pengendalian tambahan *curtain grouting* dan *Cut off wall* yang meliputi batas izin *safety factor*, terhadap besaran rembesan dan *piping*?

### 1.3 Maksud dan Tujuan

Tugas akhir ini dimaksudkan untuk menganalisis kestabilan bendungan terhadap pengaruh rembesan dan *piping* sebagai upaya pencegahan kegagalan struktur, adapun untuk tujuannya sebagai berikut:

1. Menganalisis tingkat kestabilan bendungan tanpa pengendalian struktur terhadap potensi rembesan dan *piping*.
2. Memberikan cara permodelan *curtain grouting* dan *Cut off wall* sebagai pengendalian struktur terhadap rembesan dan *piping*.
3. Membandingkan stabilitas bendungan sebelum dan setelah pemasangan pengendalian tambahan *curtain grouting* dan *cut off wall*.

### 1.4 Batasan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas Tugas Akhir ini dibuat beberapa batasan masalah untuk menghindari adanya perluasan pembahasan. Penulis membatasi Tugas Akhir ini sebagai berikut:

1. Lokasi penelitian di Bendungan Jragung, data tanah yang digunakan pada STA 0+700.
2. Data penelitian yang digunakan merupakan data utama, atau primer dan sekunder.
3. Analisis rembesan dan *piping* pada tubuh bendungan utama menggunakan program berbasis *Finite Element*.
4. Tidak membahas terkait masalah hidrologi, dan kelayakan terhadap nilai ekonomi.
5. Stabilitas bendungan dianalisis dalam muka air normal.
6. Pemodelan pada bendungan tidak menggunakan drainase hilir.

## **1.5 Sistematika Penulisan**

Penyusunan Tugas Akhir ini menggunakan sistematika penulisan yang terbagi ke dalam lima BAB, yaitu sebagai berikut:

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab I berisi penjelasan mengenai latar belakang penelitian, perumusan masalah, maksud dan tujuan, batasan penelitian, serta sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab II menjelaskan teori-teori yang berhubungan dengan judul Tugas Akhir, meliputi definisi, konsep dasar, serta kajian dari berbagai literatur dan studi kasus yang mendukung penelitian.

### **BAB III METODE PENELITIAN**

Bab III berisi uraian mengenai metode pengumpulan data, teknik pengolahan data, serta sistematika perencanaan yang diterapkan dalam penelitian ini.

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab IV menguraikan hasil penelitian yang diperoleh, dilanjutkan dengan analisis data, serta pembahasan yang dikaitkan dengan teori dan permasalahan penelitian.

### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab V berisi kesimpulan yang ditarik dari hasil dan analisis penelitian, serta saran yang diberikan sebagai masukan bagi penelitian lanjutan maupun penerapan di lapangan.

## **DAFTAR PUSTAKA**

## **LAMPIRAN**

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Bendungan

Bendungan adalah bangunan yang berupa urukan tanah, urukan batu, beton, dan atau pasangan batu yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, dapat pula dibangun untuk menahan dan menampung limbah tambang (*tailing*), atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk. Bendungan atau waduk merupakan wadah buatan yang terbentuk sebagai akibat dibangunnya bendungan. (Peraturan Pemerintah Nomor 37 Pasal 1 Tahun 2010). Atau Bendungan merupakan sebuah konstruksi penghalang yang membatasi dan mengendalikan aliran air, aliran air di sini tidak hanya terbatas pada aliran permukaan tetapi juga aliran air bawah tanah.

Bendungan sebagai struktur vital dalam memenuhi beberapa kebutuhan dasar kita, bangunan ini sering dibangun untuk menahan air dengan membentuk *reservoir* di belakang struktur di dekat sumber air alami guna mengelola air demi keperluan manusia. Bendungan memiliki berbagai bentuk, ukuran dan beragam fungsi antara lainnya penyediaan air baku, pembangkit listrik, pengendalian banjir, penyediaan air irigasi, penampungan limbah, sarana pariwisata. Bendungan mempunyai jenis sesuai dengan fungsi serta karakteristiknya, berikut ini merupakan jenis – jenis bendungan.

##### 2.1.1 Jenis-jenis Bendungan

Jenis bendungan, menurut (Sani, 2008), adalah sebagai berikut:

- a. Bendungan berdasarkan ukurannya, bendungan dibagi menjadi dua kategori. Bendungan besar (*large dams*) adalah bendungan dengan tinggi lebih dari 10 meter, diukur dari pondasi hingga ke puncak. Sementara itu, bendungan kecil (*small dams*) mencakup seluruh bendungan yang tidak memenuhi kriteria sebagai bendungan besar.
- b. Ditinjau dari tujuan pembangunannya, terdapat bendungan dengan fungsi tunggal (*single purpose dams*) yang dibuat untuk memenuhi satu kebutuhan spesifik, misalnya pembangkit listrik tenaga air. Di sisi lain, ada pula

bendungan serbaguna (*multi purpose dams*) yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, seperti irigasi, PLTA, pariwisata, hingga perikanan.

- c. Berdasarkan penggunaannya, bendungan dibedakan menjadi beberapa tipe. Bendungan penyimpanan (*storage dams*) berfungsi menampung air pada saat berlebih agar dapat digunakan kembali ketika diperlukan. Bendungan pembelok aliran (*diversion dams*) dibangun untuk menaikkan muka air sehingga dapat dialirkan ke saluran atau terowongan. Sementara itu, bendungan pengatur aliran (*distension dams*) dirancang untuk memperlambat laju air sehingga permukaan air menurun sebelum dialirkan ke sistem saluran atau terowongan.
- d. Menurut jalannya air, bendungan juga dikategorikan menjadi bendungan pelimpah (*overflow dams*), yaitu bendungan yang dirancang untuk dapat dilewati air seperti pada bangunan pelimpah, serta bendungan tidak pelimpah (*non-overflow dams*) yang sepenuhnya berfungsi menahan air tanpa membiarkannya melewati tubuh bendungan. Bendungan jenis ini umumnya dibangun dengan material beton, pasangan batu, atau bata.
- e. Berdasarkan fungsi konstruksinya, terdapat beberapa jenis bendungan, yaitu bendungan pengelak pendahuluan (*primary cofferdam* atau *dike*), bendungan pengelak utama (*cofferdam*), bendungan utama (*main dams*), serta bendungan sisi (*high level dams*).
- f. Jika dilihat dari tipe konstruksinya, bendungan dapat berupa bendungan homogen (*homogeneous dams*) yang tersusun dari material seragam pada sebagian besar volumenya, atau bendungan zonal (*zoned dams*) yang terdiri atas beberapa lapisan, seperti lapisan kedap air, filter, rip-rap, serta lapisan batu. Selain itu, terdapat bendungan urugan batu dengan lapisan kedap air di bagian muka (*impermeable face rock fill dams*), di mana umumnya digunakan lapisan aspal maupun beton bertulang. Sedangkan bendungan beton (*concrete dams*) merupakan jenis bendungan yang seluruh atau sebagian besar konstruksinya terbuat dari beton, baik bertulang maupun tidak, dan dapat dibagi lagi berdasarkan fungsi spesifiknya.

### 2.1.2 Bendungan Urugan

Bendungan urugan (*fill type dam*) atau yang sering disebut juga bendungan tipe timbunan, merupakan bendungan yang konstruksinya menggunakan material hasil galian langsung tanpa melalui proses pencampuran kimia. Secara umum, bendungan jenis ini dapat dibedakan ke dalam beberapa kategori berdasarkan jenis material utama yang digunakan dalam pembangunannya:

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

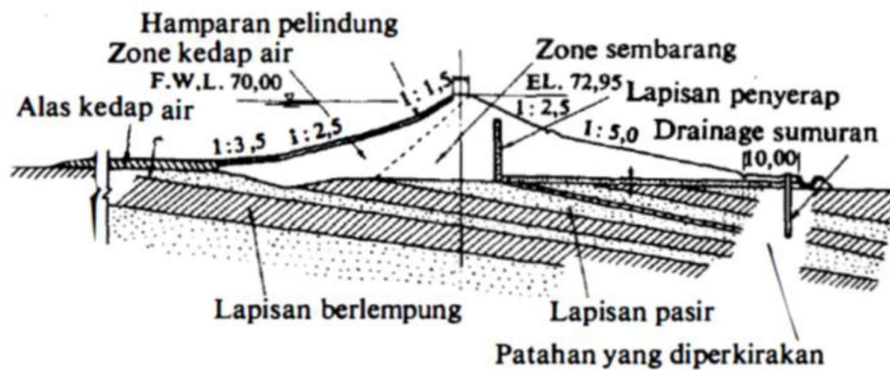
Bendungan urugan memiliki keunggulan sekaligus keterbatasan. Dari sisi kelebihan, jenis bendungan ini dapat dibangun pada hampir semua kondisi geologi dengan memanfaatkan material batuan yang tersedia di sekitar lokasi sebagai bahan utamanya. Namun, kelemahannya adalah bendungan urugan tidak dirancang untuk menahan limpasan yang melewati mercu, sehingga berisiko mengalami kerusakan serius bahkan jebol apabila terjadi aliran yang melampaui kapasitasnya.

### 2.1.3 Klasifikasi Bendungan Urugan

Berdasarkan fungsinya, bendungan berfungsi untuk menampung atau menaikkan permukaan air dalam sebuah *reservoir*, sehingga tubuh bendungan berperan dalam menahan rembesan air menuju hilir serta menyangga volume air yang ditampung. Dilihat dari cara penyusunan serta penempatan material konstruksinya, bendungan urugan umumnya dibedakan menjadi tiga tipe utama, yaitu:

1. Bendungan urugan homogen

Bendungan timbunan homogen merupakan jenis bendungan yang seluruh tubuhnya tersusun dari material tanah dengan klasifikasi serupa, biasanya berasal dari *borrow area*, kemudian dipadatkan secara mekanis menggunakan *vibrator roller* atau peralatan lain yang sesuai pada setiap lapisan dengan ketebalan tertentu. Dibandingkan dengan tipe lainnya, bendungan homogen relatif lebih mudah dibangun. Namun demikian, jenis ini juga rentan mengalami permasalahan pada tubuh bendungan. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1, kerentanan tersebut timbul karena seluruh bagian bendungan berada di bawah garis rembesan (*seepage line*) dan selalu dalam kondisi jenuh, sehingga kekuatan geser, daya dukung, serta stabilitas geser alaminya menjadi rendah.

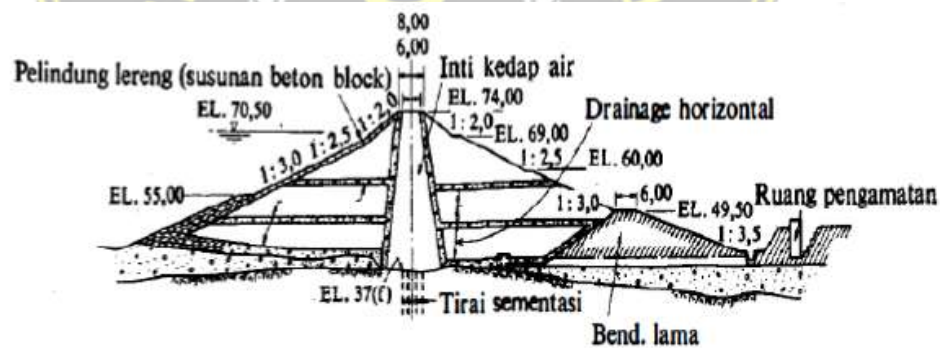


**Gambar 2. 1** Potongan Melintang Bendungan Urugan Homogen

(Sumber : Sosrodarsono & Takeda, 1977)

## 2. Bendungan urugan zonal

Apabila material penyusun tubuh bendungan disusun dengan gradasi butiran yang berbeda dan ditempatkan dalam lapisan-lapisan tertentu, maka bendungan tersebut digolongkan sebagai tipe zonal. Ilustrasi penampang bendungan zonal dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut.

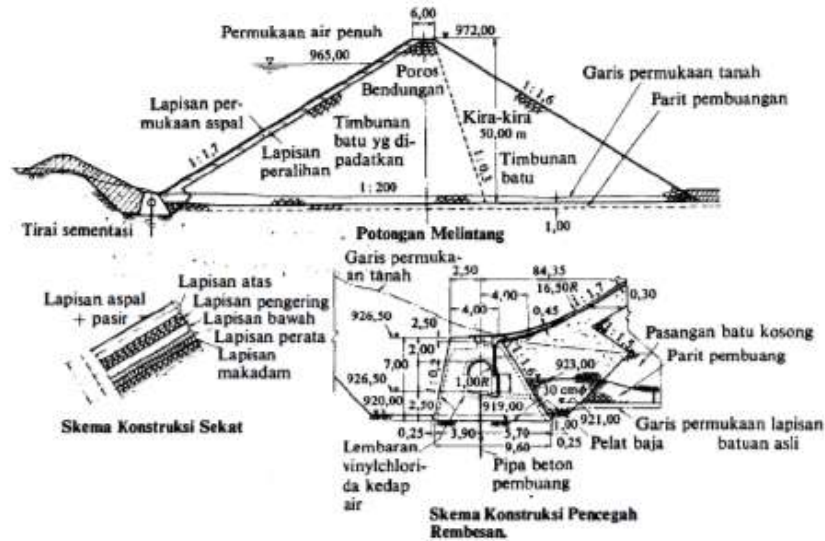


**Gambar 2. 2** Potongan Melintang Bendungan Urugan Zonal

(Sumber : Sosrodarsono & Takeda, 1977)

## 3. Bendungan urugan ersekat (bendungan sekat)

Bendungan urugan ersekat (bendungan sekat) adalah bendungan dengan kemiringan hulu yang dilapisi sekat kedap air yang terbuat dari material seperti lembaran plastik, beton bertulang, beton aspal, dan tulangan baja tahan karat dikenal sebagai bendungan sekat. Penampangnya ditunjukkan pada Gambar 2.3 di bawah ini:



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

(Sumber : Sosrodarsono & Takeda, 1977)

Secara garis besar perbedaan antara bendungan urugan homogen, bendungan zonal, dan bendungan sekat dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut ini:

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

**Gambar 2. 4** Klasifikasi Bendungan Urugan

(Sumber : Sosrodarsono Suyono & Takeda, 1981)

## 2.2 Geologi Bendungan

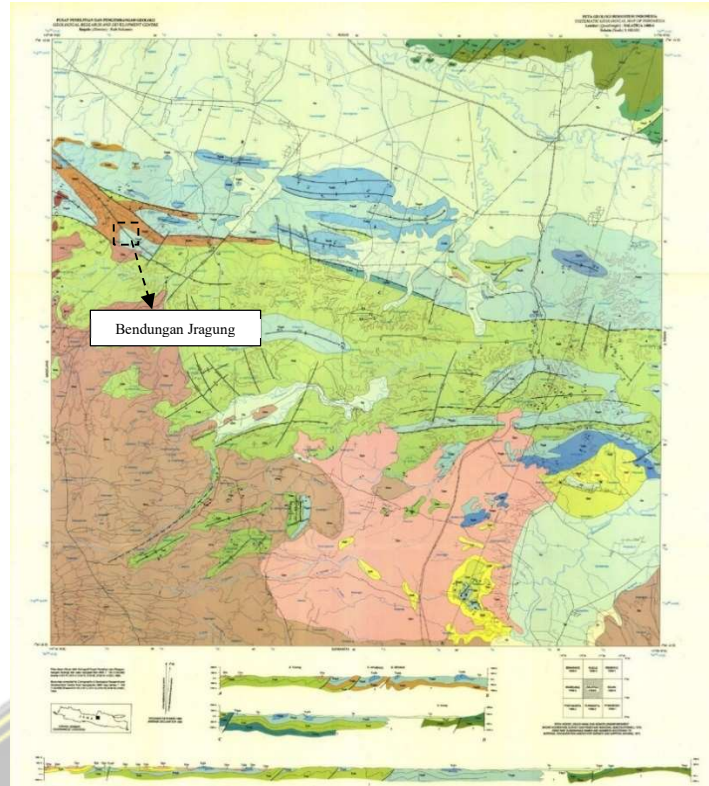
### 2.2.1 Geologi Regional

Menurut Van Bemmelen (1949), fisiografi Jawa Tengah dapat dibagi ke dalam enam satuan wilayah utama, yaitu Endapan Vulkanik Kuarter, Dataran Aluvial Jawa Utara, Antiklinorium Bogor, Pegunungan Serayu Utara dan Pegunungan Kendeng, Zona Depresi Jawa Tengah beserta Kubah dan Pegunungan Depresi Tengah, serta Pegunungan Serayu Selatan, Pegunungan Selatan Jawa Barat, dan Jawa Timur.

Pegunungan Serayu Utara dan Pegunungan Serayu Selatan adalah dua puncak geoantiklin yang bergabung membentuk pegunungan Jawa Tengah. Pegunungan Kendeng di Jawa Timur dan Zona Bogor di Jawa Barat dihubungkan oleh Pegunungan Serayu Utara. Pegunungan Serayu Selatan, di sisi lain, merupakan bagian dari Zona Depresi Bandung, sebuah titik tinggi di Jawa Tengah yang membentang membujur melintasi Jawa Barat dan dipisahkan dari bagian timur oleh Lembah Jatilawang. Bagian timur Zona Bandung merupakan bagian dari Zona Depresi Jawa Tengah.

Zona Depresi Serayu, yang juga dikenal sebagai Zona Depresi Jawa Tengah, berada di antara Pegunungan Serayu bagian utara dan selatan. Wilayah depresi ini memanjang dari Majenang ke arah Ajibarang, Purwokerto, Jatilawang, hingga Wonosobo. Lebarnya sekitar 15 kilometer pada bagian antara Purwokerto dan Banjarnegara, kemudian meluas ke arah timur hingga Wonosobo. Di beberapa tempat, zona ini tertutup oleh endapan gunung api muda, misalnya Gunung Sundoro (3.155 m) dan Gunung Sumbing (3.317 m). Lebih ke timur, Zona Depresi Jawa Tengah muncul kembali terutama di kawasan dataran Temanggung dan Magelang.

Bendungan Jragung termasuk ke dalam Zona Kendeng dimana Zona Kendeng memanjang dari Gunung Ungaran di bagian barat menuju ke arah timur sampai ke Sungai Brantas. Panjang zona ini diperkirakan 250 km, lebar di bagian barat 40 km dan mungkin menyempit di bagian timur kurang lebih 20 km, dan secara struktur termasuk ke dalam Secara umum struktur – struktur yang ada di Zona Kendeng berupa lipatan lipatan yang ada pada daerah Kendeng sebagian besar berupa lipatan asimetri bahkan beberapa ada yang berupa lipatan *overturned*.

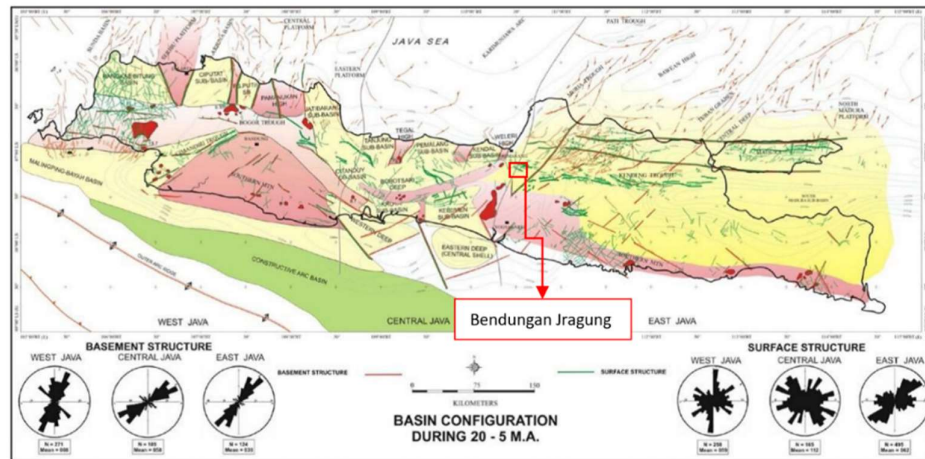


**Gambar 2. 5** Peta Geologi Regional Lembar Salatiga, Jawa (Sukardi dan T. Budhitrinsa, 1992)

Deformasi awal di Zona Kendeng terjadi pada akhir Pliosen hingga awal Plistosen, dipicu oleh gaya kompresi utara–selatan pada zona konvergensi lempeng tektonik. Tahap awal deformasi bersifat *ductile*, kemudian berkembang menjadi *brittle* sehingga menimbulkan pergeseran blok-blok dasar cekungan. Intensitas kompresi meningkat ke arah barat Zona Kendeng, menghasilkan banyak lipatan serta sesar naik yang kerap menjadi batas antar formasi. Proses deformasi ini umumnya dibagi ke dalam tiga fase. Fase pertama ditandai dengan perlipatan yang membentuk Geoantiklin Kendeng berarah barat–timur. Fase kedua berupa aktivitas sesar akibat lipatan, sedangkan fase ketiga muncul ketika perubahan dari deformasi *ductile* menjadi *brittle* menyebabkan batuan melewati kedalaman plastis dan memicu pergeseran blok dasar cekungan.

Secara umum, sesar yang terbentuk adalah sesar naik, meskipun beberapa di antaranya berkembang menjadi sesar sungkup. Pada fase ketiga, pergeseran blok dasar cekungan juga menimbulkan sesar geser dengan arah relatif utara–selatan.

Deformasi berikutnya berlangsung pada kala Kuarter secara lebih lambat dan menghasilkan struktur kubah di Sangiran. Aktivitas tektonik ini masih berlanjut hingga masa kini, meskipun dengan intensitas yang lebih lemah, yang ditunjukkan oleh keberadaan endapan termuda di Zona Kendeng berupa Endapan Undak.



**Gambar 2. 6** Peta Struktur Geologi Jawa Tengah, 2003

## 2.3 Tanah

Secara umum dalam bidang teknik, tanah dipahami sebagai himpunan partikel mineral padat yang tidak saling berikatan secara kimia dan bercampur dengan sisa-sisa bahan organik yang telah mengalami pelapukan. Di antara butiran tersebut terdapat pori-pori yang biasanya terisi oleh air maupun udara. Karakteristik tanah sangat dipengaruhi oleh ukuran, bentuk, serta komposisi kimia dari butiran penyusunnya, yang umumnya bervariasi. Dalam praktik keteknikan, tanah berperan penting baik sebagai material konstruksi maupun sebagai media pendukung pondasi bangunan (Das, 1985).

### 2.3.1 Klasifikasi Tanah

Ukuran dari partikel tanah sangat beragam dan bervariasi. Berdasarkan ukuran partikel yang dominan, tanah dapat diklasifikasikan sebagai kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*), atau lempung (*clay*), yang terdapat pada Tabel 2.1 berikut ini.

**Tabel 2. 1** Ukuran Butiran

| Nama Golongan                                                                                 | Ukuran Butiran (mm) |              |                                          |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------|------------------------------------------|---------|
|                                                                                               | Kerikil             | Pasir        | Lanau                                    | Lempung |
| Massachusetts Institute of Technology (MIT)                                                   | >2                  | 2 – 0,06     | 0,06 – 0,002                             | <0,002  |
| U.S. Department of Agriculture (USDA)                                                         | >2                  | 2 – 0,075    | 0,05 – 0,002                             | <0,002  |
| American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)                   | 76,2 - 2            | 2 – 0,075    | 0,075 – 0,002                            | <0,002  |
| Unified Soil Classification System (U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Bureau of Reclamation) | 76,2 – 4,75         | 4,75 – 0,075 | Halus (yaitu lanau dan lempung) <0,0075. |         |

(Sumber : Das, 1985)

### 2.3.2 Sistem Klasifikasi Unified

Sistem ini pada mulanya diperkenalkan oleh *Casagrande* pada tahun 1942. Pada saat ini sistem klasifikasi tersebut digunakan secara luas oleh para ahli teknik (Das, 1985). Menurut sistem ini, tanah dibagi menjadi dua kelompok besar:

1. Tanah berbutir kasar (*coarse-grained soil*) meliputi pasir dan kerikil, yaitu jenis tanah dimana kurang dari 50% sampel melewati ayakan No. 200. Simbol awal yang digunakan adalah huruf G untuk kerikil (*gravel*) dan S untuk pasir (*sand*). Apabila fraksi halus (butiran yang lolos ayakan No. 200) berada pada kisaran 5–12%, maka tanah tersebut diklasifikasikan dengan simbol ganda, misalnya GW-GM, GP-GM, GW-GC, GP-GC, SW-SM, SW-SC, SP-SM, atau SP-SC.
2. Tanah berbutir halus (*fine-grained soil*) adalah tanah dengan lebih dari 50% sampel melewati ayakan No. 200. Klasifikasi untuk tanah organik diberikan tanda PT (*peat/gambut*, *muck*, atau tanah dengan kadar organik tinggi). Tanah anorganik dilambangkan dengan huruf M (lanau), C (lempung), sedangkan huruf O dipakai untuk lanau/lempung organik. Kriteria tambahan seperti batas

cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) digunakan untuk membedakan simbol klasifikasi: ML, CL, OL, MH, CH, dan OH.

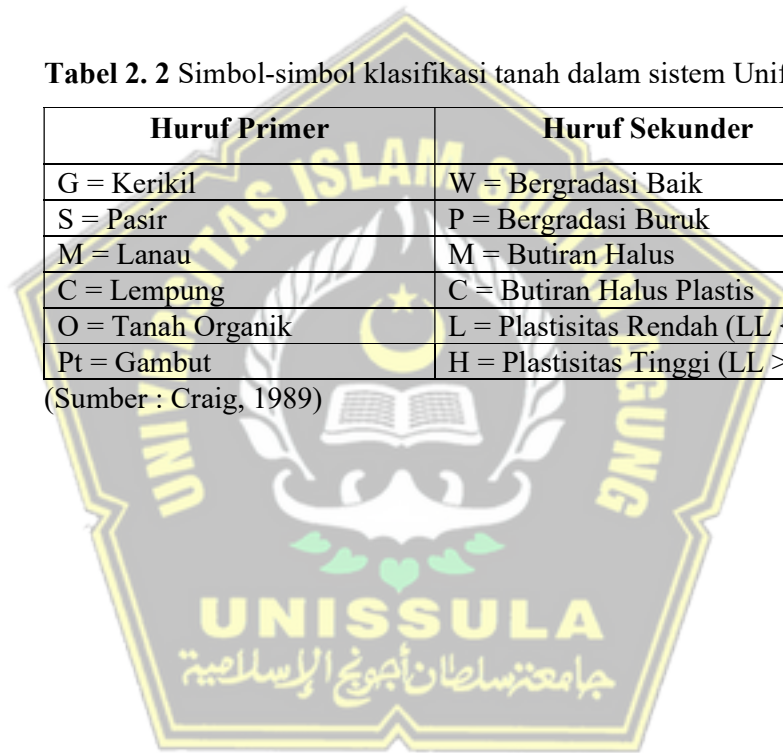
Agar klasifikasi sesuai dengan sistem USCS, beberapa hal perlu diperhatikan:

- Persentase butiran halus yang melewati ayakan No. 200.
- Persentase fraksi kasar yang lolos ayakan No. 40.
- Nilai  $C_u$  (*Uniformity coefficient*) dan  $C_c$  (*Gradation coefficient*) untuk tanah dengan 0–12% lolos ayakan No. 200.
- Nilai LL dan PI pada fraksi yang lolos ayakan No. 40 (jika  $\geq 5\%$  melewati ayakan No. 200).

**Tabel 2. 2** Simbol-simbol klasifikasi tanah dalam sistem Unified

| Huruf Primer      | Huruf Sekunder                       |
|-------------------|--------------------------------------|
| G = Kerikil       | W = Bergradasi Baik                  |
| S = Pasir         | P = Bergradasi Buruk                 |
| M = Lanau         | M = Butiran Halus                    |
| C = Lempung       | C = Butiran Halus Plastis            |
| O = Tanah Organik | L = Plastisitas Rendah ( $LL < 50$ ) |
| Pt = Gambut       | H = Plastisitas Tinggi ( $LL > 50$ ) |

(Sumber : Craig, 1989)



**Tabel 2. 3** Klasifikasi Tanah Menurut USCS

[illegible]

(Sumber : Hardiyatmo, 2002)

### 2.3.3 Data Pengambilan Tanah

Data tanah diperoleh dari hasil penyelidikan geoteknik yang dilakukan melalui uji lapangan maupun uji laboratorium. Tujuan utama penyelidikan tanah adalah untuk mengetahui kondisi geologi serta karakteristik teknis tanah yang akan berpengaruh terhadap perencanaan pondasi. Identifikasi jenis tanah di laboratorium dilakukan dengan pengambilan sampel secara berulang pada berbagai kedalaman. Sementara itu, pengujian tanah di lapangan umumnya menggunakan beberapa metode berikut:

a. Tes Boring (*Bore Log*)

Uji *Bor Log* adalah pengujian tanah yang digunakan untuk melihat secara visual lapisan tanah pendukung dan mengambil sampel tanah hingga kedalaman yang diinginkan. Uji ini juga digunakan untuk mendeskripsikan dan mengklasifikasikan tanah, dan juga digunakan sebagai bahan pengujian laboratorium.

b. SPT (*Standard Penetration Test*)

Pengujian SPT dilakukan bersamaan dengan pengeboran bore log, umumnya pada interval setiap 2 meter kedalaman atau pada lapisan tanah yang dianggap penting. Uji ini bertujuan untuk mengetahui kepadatan relatif tanah pasir atau konsistensi tanah lempung melalui jumlah pukulan (N-value) yang diperlukan untuk menembus tanah sedalam 30 cm dengan tabung sampel standar.

c. *Sieve Analys dan Hydrometer Test*

Untuk tanah berbutir kasar, dilakukan analisis gradasi dengan uji saringan (*sieve analysis*). Contoh tanah dikeringkan, kemudian disaring menggunakan satu set ayakan standar dengan ukuran tertentu. Berat tanah yang tertahan pada tiap ayakan ditimbang, lalu dihitung sebagai persentase terhadap berat total untuk mendapatkan distribusi ukuran butir.

Untuk tanah berbutir halus, dilakukan uji hidrometer (*hydrometer test*). Prinsip pengujian ini adalah sedimentasi partikel halus dalam suspensi cair, di mana butiran yang lebih kecil akan mengendap lebih lambat dibandingkan butiran yang lebih besar. Dari hasil uji diperoleh distribusi ukuran butiran halus yang tidak dapat ditentukan dengan uji saringan, yang terdapat pada Tabel 2.4 berikut ini.

**Tabel 2. 4** Klasifikasi Tanah Berdasarkan Ukuran Butiran(ASTM)

| No | Ukuran Butiran (mm) | Jenis Tanah      |
|----|---------------------|------------------|
| 1. | <0,0020             | Clay (Lempung)   |
| 2. | 0,0020 – 0,0074     | Silt (Lanau)     |
| 3. | 0,0074 – 4,7500     | Sand (Pasir)     |
| 4. | >4,7500             | Gravel (Kerikil) |

(Sumber : Das, 1985)

d. *Atterberg Limits*

Penentuan *Atterberg limits* mencakup beberapa parameter penting, yaitu:

1. Batas susut (*shrinkage limit*) : kadar air minimum Dimana anah tidak lagi mengalami perubahan volume meskipun kadar airnya terus berkurang.
2. Batas plastis (*plastic limit*): kadar air terendah Ketika tanah mulai menunjukkan perilaku plastis.
3. Batas cair (*liquid limit*): kadar air tertentu saa sifat tanah berubah dari kondisi plastis menjadi cair.
4. Indeks plastisitas (*plasticity index*): nilai yang diperoleh dari selisih antara batas cair degan batas plastis, yang menunjukkan rentang kadar air Ketika tanah masih berada dalam kondisi plastis.

e. *Index Properties*

Pengujian *index properties* dilakukan pada beberapa contoh tanah untuk mengetahui klasifikasi serta sifat fisik-mekaniknya. Tujuan utama dari pengujian ini adalah mengevaluasi karakteristik sampel tanah yang diperoleh dari lapangan. Parameter yang diuji meliputi:

1. Kadar air (*water content*): perbandingan antara berat air didalam tanah dengan berat kering tanah tersebut.
2. Berat jenis butir ( $G_s$ ) dan berat volume butir ( $\gamma_s$ ): nilai yang menunjukkan rasio antara berat butiran tanah terhadap berat air suling dengan volume dan suhu yang sama.
3. Berat volume tanah ( $\gamma$ ) : terdiri atas berat volume tanah basah ( $\gamma_b$ ) serta berat berat volume tanah kering ( $\gamma_k$ ).

4. Angka pori (*void ratio*): rasio antara volume pori dengan volume butir tanah padat.
5. Kadar pori (*porosity*): perbandingan antara volume pori dengan volume total tanah.
6. Berat isi jenuh tanah ( $\gamma_{sat}$ ) merupakan membandingkan berat tanah jenuh dan isi tanah jenuh.
7. Berat isi celup tanah ( $\gamma_{sub}$ ) merupakan suatu harga berat isi jenuh dikurang dengan berat isi air.

f. *Unconfined Compression Strength Test*

Kuat tekan bebas merupakan nilai tegangan axial pada gaya maksimum yang dapat ditahan pada suatu benda sebelum mengalami kerusakan/keretakan oleh gaya tekan.

g. *Triaxial Test*

Pada pengujian triaxial konvensional, sampel tanah berbentuk silinder dilapisi menggunakan membran karet kemudian ditempatkan ke dalam sel triaxial. Di dalam sel tersebut, sampel dikenai tekanan fluida yang merata. Selanjutnya, beban aksial diberikan secara bertahap hingga spesimen mengalami kondisi keruntuhan. *Triaxial* sangat berguna pada struktur atau bangunan yang dirancang untuk tahan gempa. Uji ini digunakan untuk berbagai material yang berkaitan *cyclic* seperti *damping ratio*, *Steady state strength*, *Recoverable modulus function*, *MFS pore-water pressure function*,  $C'$  dan  $\phi'$ .

Pengujian geser triaxial dianggap sebagai metode yang paling akurat dalam menentukan parameter kuat geser tanah, meskipun pelaksanaannya relatif mahal dan memerlukan waktu yang lebih lama. Secara umum, terdapat tiga jenis pengujian triaxial, yaitu:

- Pengujian *consolidated drained*
- Pengujian *consolidated underdrained*
- Pengujian *unconsolidated underdrained*

h. *Direct Shear Test*

Dengan menggunakan alat uji geser melingkar atau persegi panjang, uji geser langsung menerapkan gaya horizontal ( $F$ ) pada bidang horizontal dan gaya normal ( $P$ ) pada bagian atas kotak. Tekanan dihasilkan pada lantai oleh beban

yang diberikan pada alat uji. Tegangan ini, yang dapat mengakibatkan tegangan geser pada tanah yang membentuk sudut terhadap bidang geser, terdiri dari tegangan primer utama dan tegangan utama minor.

Tegangan utama sedang (*intermediate principal stress*) bekerja merata pada seluruh sisi, namun tidak diperhitungkan karena tidak menimbulkan deformasi. Dalam perencanaan konstruksi bendungan, uji geser langsung sangat penting untuk memperoleh nilai parameter kuat geser tanah berupa sudut geser dalam ( $\Phi'$ ) dan kohesi ( $C'$ ). Kedua parameter tersebut berperan besar terhadap stabilitas lereng bendungan.

i. *Uji Sand Cone*

Uji Sand Cone merupakan metode pengukuran kepadatan tanah di lapangan dengan menggunakan pasir Ottawa sebagai media standar. Tujuan utama pengujian ini adalah untuk mengetahui tingkat kepadatan tanah aktual di lapangan serta membandingkannya dengan hasil kepadatan maksimum dari uji laboratorium atau uji pemadatan berdasarkan ketentuan ASTM D-1556 dan SNI 03-2828-1992. Pasir Ottawa dipilih karena memiliki berat jenis yang konstan sehingga dapat dijadikan acuan dalam pengukuran kepadatan tanah di lapangan (Setyadi et al., 2023). Hasil pengujian ini sangat krusial dalam konstruksi bendungan, karena memberikan informasi mengenai berat jenis tanah pada setiap zona bendungan.

### 2.3.4 Parameter Tanah

#### 2.3.4.1 Koefisien Permeabilitas

Koefisien permeabilitas adalah properti tanah yang menunjukkan kemampuan tanah untuk meloloskan air melalui pori-porinya. Pada kondisi jenuh, pori-pori tanah sepenuhnya terisi oleh air. Perubahan kondisi dari jenuh menjadi tidak jenuh menyebabkan sebagian pori-pori tersebut terisi oleh udara, sehingga kemampuan tanah dalam mengalirkan air mengalami penurunan. Ketika tekanan air pori bernilai negatif, volume udara yang mengisi pori-pori tanah semakin bertambah, yang pada akhirnya menyebabkan koefisien permeabilitas tanah menurun secara signifikan. Koefisien permeabilitas dapat dihitung dengan Persamaan (2.1) dan (2.2) sebagai berikut :

$$Q = k.A.i.t \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$k = \frac{(Q.L)}{(h.A.t)} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

dengan :

$Q$  = debit (cm<sup>3</sup>/s)

$k$  = koefisien permeabilitas (cm/s)

$A$  = luas penampang (cm<sup>2</sup>),

$i$  = koefisien hidrolik =  $\frac{H}{L}$ ,

$t$  = waktu (s).

#### 2.3.4.2 Kuat Geser Tanah

Menurut (Das, 2011), kekuatan geser tanah merupakan kemampuan tanah untuk menahan gaya geser internal akibat beban luar, yang bekerja sepanjang bidang tertentu dalam tanah. Kekuatan ini menjadi faktor utama dalam mencegah pergeseran atau keruntuhan massa tanah, dan biasanya dinyatakan dalam satuan gaya per satuan luas. Tujuan dari pengujian geser langsung maupun pengujian triaksial tak terkonsolidasi dan tak terdrainasi (UU) adalah untuk mengevaluasi ketahanan tanah terhadap gaya geser horizontal, dengan cara menentukan parameter kekuatan geser tanah, yaitu nilai kohesi ( $c$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ), pada bidang geser tertentu dari sampel tanah yang diuji.

Persamaan (2.3) kuat geser tanah geoteknik berdasarkan kriteria Mohr-Coulomb:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

dengan :

$\tau$  = kuat geser tanah (kN/m<sup>2</sup>),

$c$  = kohesi tanah (kN/m<sup>2</sup>),

$\phi$  = sudut geser dalam tanah (derajat),

$\sigma$  = tegangan normal (kN/m<sup>2</sup>),

#### 2.3.4.3 Sudut Geser Tanah

Menurut (Das, 2011), sudut geser dalam merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan kekuatan geser tanah, yang merepresentasikan kecenderungan suatu material untuk melawan deformasi geser di bawah pengaruh tegangan luar. Sudut ini terbentuk dari hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser pada bidang kegagalan, dan semakin besar nilainya, maka semakin besar pula resistensi tanah terhadap gaya luar sebelum mengalami keruntuhan. Besaran nilai sudut geser dalam ( $\phi$ ) juga berkaitan dengan tingkat kepadatan suatu jenis tanah, yang dapat dilihat pada Tabel 2.5 berikut ini:

**Tabel 2. 5** Besaran Sudut Geser Dalam Tanah

| Jenis Tanah                   | Tingkat Kepadatan         | Sudut Geser ( $\phi$ ) |
|-------------------------------|---------------------------|------------------------|
| Pasir bersih kering           | Lepas ( <i>losse</i> )    | 28° - 30°              |
| Pasir bersih kering           | Padat ( <i>dense</i> )    | 35° - 40°              |
| Pasir berlanau                | -                         | 30° - 35°              |
| Lanau ( <i>silt</i> )         | Konsisten rendah – tinggi | 26° - 35°              |
| Lanau berlempung              | Plastisitas sedang        | 27° - 32°              |
| Lempung ( <i>clay</i> ) lunak | Tak terkonsolidasi        | 0° - 10°               |
| Lempung keras                 | Terkonsolidasi            | 20° - 26°              |
| Lempung berpasir              | -                         | 25° - 30°              |
| Lempung berlanau              | -                         | 22° - 28°              |
| Krikil ( <i>gravel</i> )      | Padat                     | 35° - 45°              |

( Sumber : Bowles, 1992)

## 2.4 Rembesan Bendungan

### 2.4.1 Umum

Dalam perencanaan bendungan tipe timbunan tanah (*earthfill*) maupun timbunan batu (*rockfill*), salah satu aspek yang paling penting adalah pengendalian terhadap potensi erosi internal, *piping*, serta timbulnya tekanan air pori yang berlebihan, baik pada tubuh bendungan maupun pada pondasinya. Rembesan (*seepage*) merupakan

aliran air yang bergerak melalui pori-pori tanah atau celah pada struktur bendungan akibat adanya perbedaan tinggi muka air atau gradien tekanan antara sisi hulu dan hilir. Secara umum, rembesan merupakan fenomena yang wajar terjadi, namun apabila tidak dikendalikan dengan baik dapat menimbulkan dua permasalahan utama, yaitu:

1. Kehilangan air secara berlebihan yang mengurangi kapasitas tampung waduk.
2. Terjadinya *piping*, yaitu erosi pada jalur keluarnya air rembesan di bagian lereng urugan atau pondasi, yang berkembang ke arah hulu hingga membentuk saluran seperti pipa.

Erosi ini dapat muncul baik di pondasi maupun dalam tubuh bendungan yang bersifat kohesif. Prosesnya biasanya bermula dari titik lemah di hilir atau pada jalur aliran terkonsentrasi di material timbunan yang kurang padat, seperti bidang kontak antara timbunan dan pondasi, bekas galian, lubang bor, liang hewan, atau akar tanaman. Partikel tanah yang terlepas akan membentuk pipa-pipa kecil yang kemudian merambat ke arah hulu. Lintasan pipa tersebut umumnya menyerupai pola jaringan aliran (*flownet*). Oleh karena itu, diperlukan sistem pengendalian yang dipantau secara terus-menerus pada area dengan potensi rembesan tinggi (Srivastava, 2011).

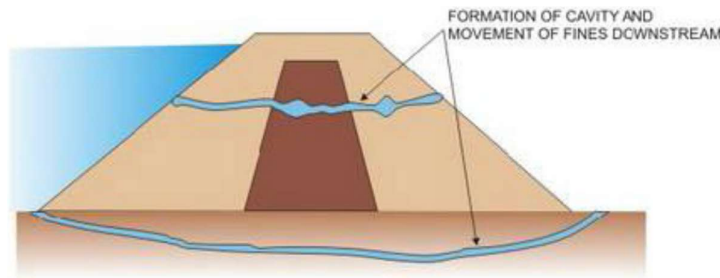
Untuk meminimalkan risiko yang ditimbulkan akibat rembesan, metode pengendalian umumnya dikelompokkan ke dalam dua pendekatan utama, yaitu:

Dalam upaya mengurangi risiko tersebut, metode pengendalian rembesan umumnya terbagi menjadi dua kelompok:

1. Upaya mengurangi debit rembesan, yang dilakukan melalui
  - a. Pembuatan *cut-off trenches* atau parit halang,
  - b. Injeksi semen atau bahan lainnya dalam bentuk *grouting tirai*,
  - c. Pemasangan dinding penahan berupa beton atau baja (*sheet pile walls* maupun *concrete cut-off walls*),
  - d. Penerapan lapisan kedap air di hulu (*upstream blanket*).
2. Upaya mengendalikan serta mengalirkan rembesan, yang dilakukan dengan:
  - a. Penerapan timbunan zonal (*embankment zoning*),
  - b. Pemasangan selimut drainase (*longitudinal drain* atau *blankets*),

- c. Penerapan sistem drainase vertikal (*chimney drain*),
- d. Pembuatan drainase kaki (*toe drains*),
- e. Penggunaan sumur pelepas tekanan (*relief wells*).

Kedua metode tersebut memiliki prinsip kerja yang berbeda, namun pada umumnya digunakan secara terpadu dalam perencanaan bendungan untuk mengendalikan rembesan (Lee et al., 2017).



**Gambar 2. 7** Erosi Internal dan *Piping* pada Tubuh Bendungan dan Fondasi  
(Sumber : Module 4, *Hydraulic Structures For Flow Diversion and Storage*, 2009)

#### 2.4.2 Hukum Darcy

Rembesan adalah pergerakan udara atau cairan yang melewati suatu media atau massa tanah tertentu. Konsep ini pertama kali dikaji oleh Henry Darcy, seorang ahli hidraulika asal Prancis pada tahun 1856, melalui eksperimennya mengenai aliran air pada lapisan tanah. Karena kecepatan aliran dalam tanah yang relatif kecil, maka alirannya dapat dipecah menjadi lamina. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa kecepatan aliran air berbanding lurus dengan gradien hidraulik tanah.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam hukum Darcy, diantaranya:

1. Kecepatan aliran ( $V_d$ ) didefinisikan sebagai total debit udara yang melewati luas penampang massa tanah dalam suatu interval waktu tertentu, sehingga menggambarkan laju aliran fluida. Sedangkan kecepatan rembesan ( $V_s$ ) merupakan kecepatan nyata yang dialami partikel udara ketika bergerak melalui jalur pori-pori tanah. Nilai  $V_s$  lebih besar dibandingkan  $V_d$  karena aliran hanya berlangsung di ruang pori, bukan keseluruhan volume tanah.
2. Kecepatan rembesan dapat dihitung dengan membagi kecepatan aliran keluar terhadap nilai porositas tanah. Dengan demikian, besarnya kecepatan rembesan berbanding terbalik dengan tingkat porositas.

3. Hukum Darcy hanya berlaku pada kondisi aliran laminar, di mana kecepatan aliran ( $V_d$ ) berbanding lurus dengan gradien hidrolik ( $i$ ), serta arah aliran udara dianggap sejajar dan lurus. Pada kondisi tertentu, seperti aliran melalui kerikil kasar atau celah pada batuan, pola aliran dapat berubah menjadi turbulen. Namun, untuk sebagian besar jenis tanah, persamaan Darcy tetap relevan, dengan  $V_d$  dinyatakan sebanding dengan akar kuadrat dari gradien hidrolik.
4. Penerapan hukum Darcy hanya berlaku pada kondisi tanah jenuh. Sementara itu, pada material tak jenuh, aliran berlangsung secara "*transient*" atau berubah-ubah terhadap waktu (*time dependent*).
5. Hukum Darcy memiliki keterbatasan dalam menggambarkan aliran pada tanah berbutir kasar maupun pada celah-celah batuan, karena karakteristik alirannya tidak sepenuhnya sesuai dengan asumsi dasar hukum tersebut.

Hukum Darcy dinyatakan dalam Persamaan (2.4), (2.5), dan (2.6) sebagai berikut :

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

$$V = k \cdot i \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

dengan :

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

$k$  = konstanta yang dikenal sebagai koefisien permeabilitas (cm/s)

$V$  = kecepatan rembesan (cm/s),

$i$  = gradien hidrolik

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

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

$L$  = panjang lapisan tanah yang dirembesi (m).

### 2.4.3 Rembesan Pada Tubuh Bendungan

Tubuh bendungan harus memiliki kemampuan untuk menahan pengaruh gaya yang timbul akibat aliran filtrasi melalui celah antar butir tanah penyusun tubuh maupun

pondasi bendungan. Pemeriksaan terhadap elemen-elemen berikut diperlukan untuk menjamin kemampuan ini:

1. Elevasi muka air pada waduk berperan penting dalam menentukan posisi terbentuknya garis rembesan atau garis depresi (*seepage line*) di tubuh bendungan.
2. Besarnya debit filtrasi yang keluar melalui bendungan menjadi salah satu parameter penting dalam evaluasi rembesan.
3. Aliran filtrasi juga dapat menimbulkan risiko terjadinya *piping* maupun sembulan (*boiling*), akibat pengaruh gaya hidrodinamis yang bekerja di dalam massa tanah.

#### 2.4.3.1 Formasi garis depresi (*seepage line formation*)

Formasi garis depresi pada zone kedap air suatu bendungan dapat diperoleh dengan Persamaa (2.7) metode Casagrade.

$$\sqrt{\frac{Kv}{Kh}} \dots\dots\dots (2.7)$$

Garis rembesan dapat diperoleh dengan Persamaan (2.8) dan (2.9) parabola dengan bentuk dasar berikut :

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0} = \sqrt{(2 \cdot y_0 \cdot x) + y_0^2} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$\text{dan } y_0 = \sqrt{h^2 + d^2 - d} \dots\dots\dots (2.9)$$

dengan :

$$h = ELV_{MAN} - ELV_{Dasar} \text{ (m)}$$

$$d = \frac{\text{lebar puncak} + (\text{lebar dasar} - \text{lebar puncak})}{3} \text{ (m)}$$

#### 2.4.3.2 Kapasitas aliran filtrasi

Kapasitas filtrasi adalah jumlah air yang mampu merembes melewati tubuh maupun pondasi bendungan. Setiap bendungan memiliki batasan tertentu terkait besarnya rembesan yang masih dapat diterima. Apabila debit filtrasi melampaui nilai ambang tersebut, maka kehilangan air akan semakin besar dan dapat memicu masalah serius, seperti terbentuknya *piping* ataupun terjadinya sembulan (boiling) pada area dasar bendungan.

##### 1. Berdasarkan trayektori aliran

$$Q_f = \frac{N_f}{N_p} K.H.L \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

dengan :

- $Q_f$  = kapasitas aliran filtrasi ( $\text{m}^3/\text{dt}$ )
- $N_f$  = angka pembagi garis trayektori aliran filtrasi
- $N_p$  = angka pembagi dari garis equipotensial
- $k$  = koefisien filtrasi ( $\text{m}/\text{dt}$ )
- $H$  = tinggi tekanan air total (m)
- $L$  = panjang profil melintang tubuh bendungan (m)

##### 2. Berdasarkan rumus empiris

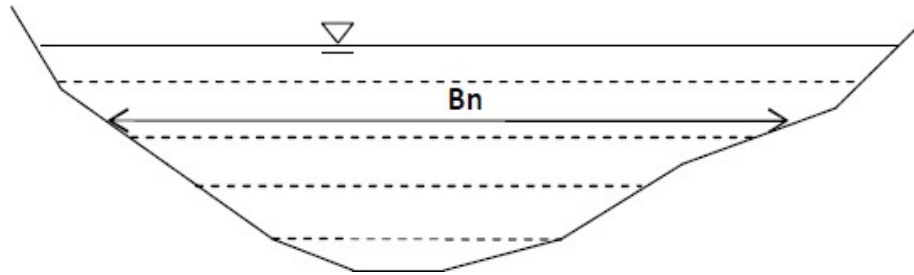
$$Q = \sum q.B \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

dan

$$q = k.i.A \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

dengan :

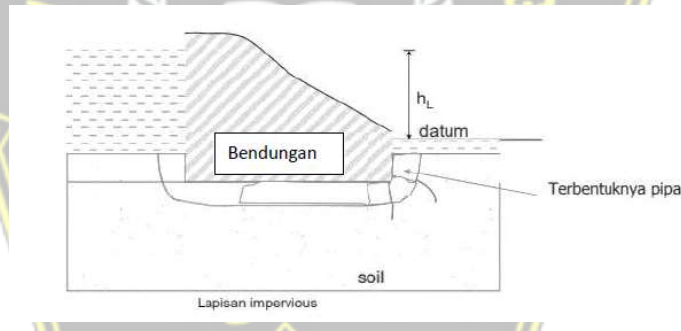
- $Q$  = kapasitas filtrasi
- $q$  = kapasitas filtrasi per unit panjang tubuh bendungan
- $B$  = lebar potongan memanjang tubuh bendungan
- $k$  = koefisien filtrasi
- $i$  = kemiringan hidroulik
- $A$  = luas potongan melintang yang dilalui aliran filtrasi per unit lebar



**Gambar 2. 8** Profil Memanjang sebuah Bendungan Tipe Urugan  
(Sumber : Sosrodarsono & Takeda, 1989)

#### 2.4.3.3 Gejala-gejala sufosi (*piping*) dan sembulan (*boiling*)

Kecepatan aliran filtrasi dalam tubuh bendungan harus dikendalikan agar tetap berada dalam batas aman. Hal ini bertujuan untuk menghindari risiko terjadinya sufusi maupun sembulan yang dapat timbul akibat pengaruh gaya hidrodinamik. *Piping* dapat mengakibatkan keruntuhan tubuh bendungan sehingga mengganggu kestabilannya. Penentuan faktor keamanan terhadap *piping* dilakukan melalui analisis rembesan yang digunakan untuk mengidentifikasi kemungkinan terjadinya fenomena tersebut.



**Gambar 2. 9** Ilustrasi Terjadinya *Piping*, (P3 SDA dan Konstruksi ,2008)

Dengan demikian, keamanan bendungan urugan terhadap potensi terjadinya *piping* dapat dievaluasi menggunakan Persamaan (2.13), (2.14), dan (2.15) berikut.

$$i_{cr} = \frac{(Gs - 1)}{(1 + e)} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$i_{cal} = \frac{H}{d} X \left( \frac{1}{\Pi} X \sqrt{\lambda} \right) \dots\dots\dots (2.14)$$

$$FS_{\text{piping}} = \frac{i_{cr}}{i_{cal}} \dots\dots\dots (2.15)$$

dengan :

$i_{cr}$  = gradien hidraulik kritis

$i_{cal}$  = gradien keluaran dari hasil analisa rembesan

$SF$  = *safety factor* terhadap gejala *piping* ( $>4$ )<sup>1</sup>

$e$  = void rasio

$G_s$  = specific gravity

$H$  = tinggi muka air (m)

$d$  = tinggi rembesan dihilir (m)

$$\lambda = \frac{(1 + \sqrt{1 + a^2})}{2}$$

$$a = \frac{b}{d}$$

1 Sumber : Metode analisis dan cara pengendalian rembesan air untuk bendungan tipe urugan (BSN, 2016)

#### 2.4.4 Kegagalan Akibat Rembesan

Titik terlemah pada waduk, seperti fondasi, badan bendungan, atau sekitar abutmen, adalah tempat air secara alami akan mencari jalan keluar. Secara umum, potensi masalah rembesan yang dapat menyebabkan keruntuhan terbagi dalam dua kategori:

##### 1. Tekanan Angkat (*Uplift*)

Tekanan angkat dapat terjadi pada lapisan pondasi yang permeabel, di mana tekanan air dari sisi hulu berpindah ke bagian hilir melalui lapisan porus. Kondisi ini menghasilkan gaya ke atas pada lapisan yang tertekan. Lapisan tersebut dapat terangkat dan mengalami kerusakan jika tekanan air pori di dasar lebih tinggi daripada berat tanah dan timbunan di atasnya.

##### 2. *Piping*

*Piping* terjadi akibat aliran air melalui pori tanah yang menyeret partikel halus dari bagian hilir titik keluarnya rembesan. Fenomena ini biasanya diawali

dengan munculnya gejala *boiling*, berupa keluarnya air bercampur tanah pada lereng hilir. Partikel yang terlepas kemudian terbawa aliran, membentuk saluran kecil yang secara bertahap berkembang ke arah hulu. Proses ini dipengaruhi oleh gradien hidraulik ( $h/L$ ) yang meningkat seiring berkurangnya panjang lintasan aliran ( $L$ ), sementara tinggi tekanan air ( $h$ ) tetap konstan selama elevasi muka air waduk tidak berubah. Jika tidak segera ditangani, kecepatan aliran akan semakin tinggi hingga tekanan hidraulik terlepas, yang pada akhirnya memicu keruntuhan bendungan.

Beberapa kondisi yang dapat memperbesar risiko terjadinya *piping* antara lain:

- a. Rembesan melalui lapisan tanah yang mudah tererosi tanpa adanya usaha untuk mengurangi gradien hidraulik.
- b. Tidak adanya lapisan penyaring atau mekanisme pengontrol tekanan, yang menyebabkan aliran membawa partikel tanah.
- c. Mekanisme pengontrol rembesan yang digunakan tidak berfungsi.

Tanah yang paling rentan terhadap *piping* biasanya berupa pasir halus dengan gradasi buruk, tanah urai, atau material berplastisitas rendah dengan  $PI < 6\%$ . Material seperti pasir bergradasi baik bercampur kerikil dengan plastisitas rendah lebih tahan terhadap *piping*, sedangkan tanah lempungan dengan  $PI > 15\%$  relatif lebih resisten, meskipun masih mungkin mengalami erosi internal.

## **2.5 Pemasangan Pengendalian Rembesan Tambahan**

Pemasangan pengendalian rembesan pada bendungan bertujuan untuk mencegah atau meminimalkan rembesan air melalui tubuh dan pondasi bendungan, yang dapat mengancam stabilitas dan keamanan struktur bendungan tersebut.

### **2.5.1 Grouting**

*Grouting* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk meningkatkan kekuatan pondasi bendungan. Metode ini dilakukan untuk mengisi retakan, rongga, dan celah pada lapisan target, zat semi-cair (*slurry*) disuntikkan ke dalam batuan atau tanah melalui lubang bor pada tekanan tertentu. Pada awalnya, istilah *grouting*

(*cementation*) hanya merujuk pada penggunaan semen portland, baik murni maupun dicampur pasir. Namun, seiring perkembangan teknologi, material lain seperti bentonit, lempung, aspal, serta bahan kimia juga digunakan, sehingga istilah *grouting* memiliki cakupan yang lebih luas (Legget dalam Pangesti, 2005).

Dalam kegiatan *grouting*, umumnya dilakukan pengujian permeabilitas menggunakan uji Lugeon. Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh Maurice Lugeon pada tahun 1933 sebagai cara untuk mengevaluasi tingkat permeabilitas batuan. Nilai yang dihasilkan disebut Lugeon (Lu), yaitu parameter yang merepresentasikan respon deformasi massa batuan terhadap aliran air bertekanan. Jumlah air yang dapat meresap ke dalam satu meter formasi batuan dalam satu menit ditunjukkan oleh pengukuran ini. Informasi tersebut berguna untuk mengetahui karakteristik aliran dalam batuan sekaligus sifat ketahanan batuan terhadap infiltrasi air. Menurut (Sosrodarsono & Takeda, 1977) nilai 1 Lugeon setara dengan koefisien filtrasi ( $k$ ) sebesar  $1,0 \times 10^{-5}$  cm/dt.

Perhitungan nilai Lugeon dapat dilakukan menggunakan Persamaan (2.16) berikut.

$$Lu = \frac{10Q}{p \cdot L} \dots\dots\dots (2.16)$$

dengan :

$Lu$  = nilai *lugeon*

$Q$  = debit yang masuk melalui lubang bor (l/menit)

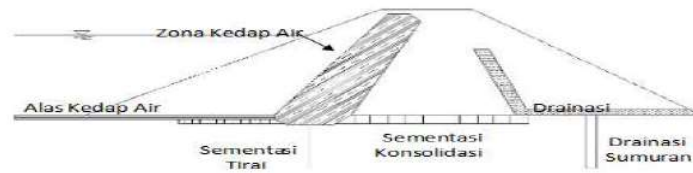
$p$  = tekanan uji ( $\text{kg/cm}^2$ )

$L$  = panjang bagian yang diuji (m)

#### 2.5.1.1 Sementasi tirai (*curtain grouting*)

Metode *curtain grouting* yang dikenal sebagai "semen tirai" adalah untuk menciptakan lapisan kedap air di dalam pondasi yang berfungsi sebagai tirai untuk memperlambat laju filtrasi. Dengan adanya lapisan ini, jalur rembesan dipaksa bergerak lebih dalam melalui bagian bawah tirai sehingga volume air yang melewati pondasi bendungan dapat berkurang. Biasanya, tirai sementasi ditempatkan tepat di bawah lapisan kedap air pada tubuh bendungan.

(Sosrodarsono Suyono & Takeda, 1981) menyatakan bahwa pelaksanaan sementasi umumnya berkisar antara 0 hingga 50% dari tinggi efektif muka air waduk.



**Gambar 2. 10** Sistem Pencegahan Kebocoran Pada Bendungan Urugan

Sebagai pendekatan yang sangat umum, guna mencari kedalaman sementasi tirai digunakan Persamaan (2.17) sebagai berikut :

$$d = \frac{1}{3}h + c \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

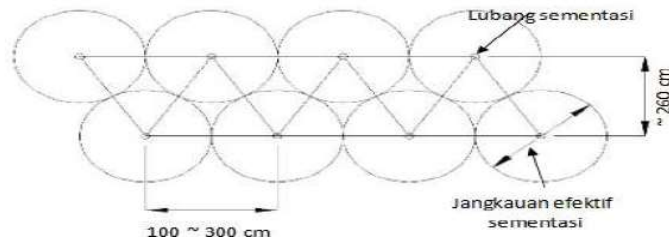
dengan :

$d$  = kedalaman pengeboran (m)

$h$  = tinggi tekanan statis air (m)

$c$  = koefisien (8 s/d 20)

Pekerjaan Sementasi, lubang bor seringkali disusun dalam pola berselang-seling, minimal dua baris, selama proses sementasi. Dengan panjang sisi bervariasi antara 100 hingga 300 cm, konfigurasi ini membentuk segitiga sama sisi (Sosrodarsono Suyono & Takeda, 1981).



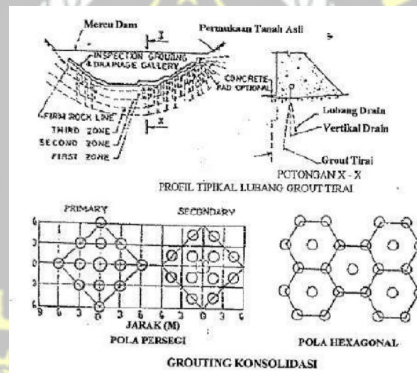
**Gambar 2. 11** Penempatan Lubang-lubang Sementasi

#### 2.5.1.2 Sementasi selimut (*blanket grouting*)

*Blanket grouting* umumnya dilaksanakan lebih dulu atau bersamaan dengan pembangunan tirai *grouting*, bergantung pada kondisi geologi setempat. Metode ini ditujukan untuk memperkuat lapisan permukaan tanah maupun batuan pondasi yang berada tepat di bawah inti (*core*) bendungan. Selain itu, *blanket grouting* juga berfungsi sebagai lapisan pelindung tambahan bagi tirai *grouting* dari pengaruh aliran rembesan.

#### 2.5.1.3 Sementasi konsolidasi (*consolidation grouting*)

*Grouting* konsolidasi pada prinsipnya memiliki fungsi serupa dengan *blanket grouting*, dan dalam sejumlah literatur kedua istilah tersebut sering dianggap setara. Metode ini diterapkan untuk memperbaiki kualitas lapisan tanah bagian atas yang berpotensi retak atau menurun mutunya, sekaligus meningkatkan keseragaman serta kekuatan pondasi bendungan, elemen struktur, maupun pelindung terowongan.



**Gambar 2. 12** Pola Lubang *Grouting* Konsolidasi

(Sumber: Pangesti, 2005)

#### 2.5.2 *Cut off wall*

*Cut off wall* pada bendungan merupakan elemen vertikal yang dibangun di dalam tubuh maupun pondasi dengan tujuan utama menciptakan lapisan kedap air. Peran utamanya adalah mengendalikan rembesan air tanah yang dapat memicu erosi internal, *piping*, kehilangan air, hingga berisiko menimbulkan kegagalan struktur. Umumnya, posisi *Cut off wall* ditempatkan di bagian hulu sumbu bendungan agar

tekanan hidrolik yang tinggi tidak secara langsung berdampak pada stabilitas bendungan. Dengan adanya struktur ini, debit serta energi rembesan dapat ditekan. Untuk meningkatkan kinerja, *Cut off wall* sering dikombinasikan dengan metode pengendalian rembesan lainnya.

Berdasarkan Pedoman Departemen Pekerjaan Umum, efektivitas *Cut off wall* hanya dapat tercapai apabila struktur ini menembus lapisan permeal hingga masuk ke lapisan kedap air. Apabila hanya dibangun secara parsial (sekitar 50% dari ketebalan lapisan permeal), maka penurunan rembesan yang dihasilkan relatif kecil, yaitu sekitar 20%. Meski demikian, metode parsial ini tetap digunakan sebagai langkah awal pengendalian dengan memotong zona permeal bagian atas yang kadang tidak teridentifikasi saat investigasi.

Namun, *Cut off wall* parsial kurang signifikan dalam menurunkan gradien keluaran, sehingga diperlukan tindakan tambahan seperti pemasangan sistem drainase pondasi atau drainase kaki. Desain *Cut off wall* yang ideal adalah dengan penetrasi penuh hingga lapisan semi-kedap, di mana kedalaman penetrasi dan potensi penurunan gradien keluaran perlu diperhitungkan secara hati-hati.

Efektivitas dan perhitungan kedalaman optimal *Cut off wall* dijelaskan lebih lanjut dalam pedoman pengendalian rembesan (PUPR, 2005), termasuk formulasi yang ditunjukkan pada Persamaan (2.18).

$$z_{\text{cut off wall}} = (\text{Elv dasar bendungan} - \text{Elv dasar tanah kedap air}) \quad (2.18)$$

*Cut off wall* memiliki jenis-jenis yang digunakan pada bendungan, yaitu:

1. *Cut off wall* paritan slari semen-bentonit
2. *Cut off wall* paritan slari tanah-bentonit
3. *Cut off wall* beton
4. *Cut off wall* tiang, galerin beton bersusun, dan *Cut off wall* tipis

**Tabel 2. 6** Karakteristik Material Untuk *Cut off Wall*, ICOLD (2005)

| Jenis Material | Kekuatan (Mpa) | Permeabilitas (m/dt) | Deformabilitas | Sifat Rekahan | Komposisi                              |
|----------------|----------------|----------------------|----------------|---------------|----------------------------------------|
| Beton tremi    | 30-50          | $10^{-12}$           | Kaku           | Mudah retak   | Agregat + semen slump 20cm w/c=0.5-0.7 |

| Jenis Material | Kekuatan (Mpa) | Permeabilitas (m/dt) | Deformabilitas | Sifat Rekahan                                  | Komposisi                                     |
|----------------|----------------|----------------------|----------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Beton plastis  | 1.0-3.0        | $10^{-9}$            | Tinggi         | Tahan terhadap regangan sampai 10% tanpa retak | Semen + agregat + lempung + bentonite w/c=0.5 |
| Slari semen    | 0.1-1.0        | $10^{-8}$            | Sangat tinggi  | Tahan terhadap deformasi dan tekanan lateral   | Semen + bentonite w/c=0.5                     |

Sumber : ICOLD, Bulletin 129 (2005)

## 2.6 Beban Gempa

### 2.6.1 Umum

Beban gempa merupakan gaya inersia yang muncul akibat getaran atau guncangan seismik yang bekerja pada permukaan tanah. Dalam konteks analisis stabilitas bendungan urugan, pengaruh beban gempa diperhitungkan dengan mengacu pada pedoman teknis yang diterbitkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, salah satunya (Pd t-14-2004-A, 2004).

### 2.6.2 Jenis-Jenis Gempa

Menurut pedoman (Pd t-14-2004-A, 2004), terdapat dua kategori beban gempa yang digunakan dalam perencanaan bendungan baru maupun evaluasi stabilitas struktur eksisting, yaitu:

1. OBE (*Operating Basis Earthquake*), atau gempa bumi dasar operasi

Suatu gempa bumi dianggap sebagai OBE jika tingkat getaran tanahnya memiliki peluang 50% untuk tidak terlampaui dalam satu abad. Besarnya sering dihitung menggunakan metode probabilistik untuk memastikan magnitudonya.

2. MDE (*Maximum Design Earthquake*), atau Gempa Bumi Desain Maksimum

MDE, yang akan digunakan untuk desain atau analisis, adalah gempa bumi yang menyebabkan guncangan paling besar di lokasi penelitian.

### 2.6.3 Tingkat Risiko Bendungan

Kategorisasi kelas risiko dan kriteria beban seismik yang digunakan dalam proses desain bendungan tanggul adalah dua aspek penting yang harus diperhitungkan saat menganalisis tingkat bahaya bangunan.

### 2.6.3.1 Klasifikasi kelas risiko

Seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.7 di bawah, tingkat risiko bangunan diperhitungkan saat menentukan kelas risiko beban seismik yang digunakan dalam perencanaan.

**Tabel 2. 7** Kriteria Faktor Risiko Untuk Evaluasi Keamanan Bendungan

| Faktor Risiko                                | Angka Bobot Dalam Kurang |                 |                    |                  |
|----------------------------------------------|--------------------------|-----------------|--------------------|------------------|
|                                              | Ekstrem                  | Tinggi          | Moderat            | Rendah           |
| Kapasitas ( $10^6\text{m}^3$ ) ( $FR_k$ )    | >100<br>(6)              | 100-1,25<br>(4) | 1,00-0,125<br>(2)  | <0,125<br>(0)    |
| Tinggi (m) ( $FR_t$ )                        | >45<br>(6)               | 45-30<br>(4)    | 30-15<br>(2)       | <15<br>(0)       |
| Kebutuhan Evakuasi (jumlah orang) ( $FR_e$ ) | >1000<br>(12)            | 1000-100<br>(8) | 100-1<br>(4)       | 0<br>(0)         |
| Tingkat Kerusakan Hilir ( $FR_h$ )           | Sangat tinggi<br>(12)    | Tinggi<br>(10)  | Agak tinggi<br>(8) | Moderat<br>(4)   |
|                                              |                          |                 |                    | Tidak ada<br>(0) |

(Sumber : Pd t-14-2004-A, 2004)

Spesifikasi teknis bendungan yang dirumuskan dalam Persamaan (2.19) menjadi dasar dalam mengklasifikasikan kelas risiko.

$$FR_{tot} = FR_k + FR_t + FR_e + FR_h \dots\dots\dots (2.19)$$

dengan :

$FR_{tot}$  = faktor risiko total (bobot)

$FR_k$  = faktor risiko pengaruh kapasitas waduk (bobot)

$FR_t$  = faktor risiko pengaruh tinggi bendungan (bobot)

$FR_e$  = faktor risiko kebutuhan evakuasi (bobot)

$FR_h$  = faktor risiko tingkat kerusakan hilir (bobot), diperoleh dari Pedoman Klasifikasi Bahaya pada Bendungan

### 2.6.3.2 Kriteria beban gempa untuk desain bendungan

Faktor risiko total menjadi dasar pembagian kelas risiko desain, yang dikelompokkan ke dalam empat kategori sebagaimana tercantum pada Tabel 2.8: kelas I (rendah), kelas II (moderat), kelas III (tinggi), dan kelas IV (ekstrem).

Kriteria pembebanan gempa ditetapkan dengan merujuk pada kelas risiko dalam Tabel 2.9, dan analisis dilakukan untuk dua tingkatan gempa.

**Tabel 2. 8** Kelas Risiko Bendungan Dan Bangunan Air

| Faktor Risiko Total | Kelas Risiko |
|---------------------|--------------|
| (0-6)               | I (Rendah)   |
| (7-18)              | II (Moderat) |
| (19-30)             | III (Tinggi) |
| (31-36)             | IV (Ekstrem) |

(Sumber : Pd t-14-2004-A, 2004)

**Tabel 2. 9** Kriteria Beban Gempa untuk Desain Bendungan

| Kelas Risiko Dengan Masa Guna                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Persyaratan Tanpa Kerusakan |                 | Persyaratan Diperkenankan Ada Kerusakan Tanpa Keruntuhan |                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | T (thn)                     | Metode Analisis | T (thn)                                                  | Metode Analisis             |
| IV<br>N=50-100                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 100-200<br>$a_d \geq 0,1g$  | Koef. gempa     | 10.000 (MDE)                                             | Koef. gempa atau dinamik *  |
| III<br>N=50-100                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 50-100<br>$a_d \geq 0,1g$   | Koef. gempa     | 5000 (MDE)                                               | Koef. gempa atau dinamik ** |
| II<br>N=50-100                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 50-100<br>$a_d \geq 0,1g$   | Koef. gempa     | 3000 (MDE)                                               | Koef. gempa atau dinamik *  |
| I<br>N=50-100                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 50-100<br>$a_d \geq 0,1g$   | Koef. gempa     | 1000 (MDE)                                               | Koef. gempa atau dinamik *  |
| Catatan :<br>1) Untuk bendungan besar dengan kondisi geologi setempat yang khusus, Peta Zona Gempa dalam bab V tidak dapat digunakan, dan perlu dilakukan studi gempa tersendiri.<br>2) Analisis dinamik dapat dilakukan dengan analisis ragam sambutan gempa atau Sejarah waktu percepatan gempa.<br>*) Penjelasan lebih terperinci periksa tabel 2.10 |                             |                 |                                                          |                             |

(Sumber : Pd t-14-2004-A, 2004)

**Tabel 2. 10** Prosedur Analisis yang Dianjurkan untuk Bendungan Tipe Urugan

| Kelas Risiko                        |     |  | Tinggi Bendungan $H \leq 15$ |               | Tinggi Bendungan $H > 15$ |               |
|-------------------------------------|-----|--|------------------------------|---------------|---------------------------|---------------|
|                                     |     |  | $a_d \geq 0,25g$             | $a_h > 0,25g$ | $a_d \leq 0,25g$          | $a_d > 0,25g$ |
| Persyaratan tanpa kerusakan (OBE) : | I   |  | Ea                           | Ea            | Eb                        | Eb            |
|                                     | II  |  | Ea                           | Ea            | Eb                        | Eb            |
|                                     | III |  | Ea                           | Ea            | Eb                        | Eb            |
|                                     | IV  |  | Tidak ada                    | Tidak ada     | Eb                        | Eb            |
| Persyaratan yang diperkenankan ada  | I   |  | Ea                           | Ec            | Eb                        | Ec            |
|                                     | II  |  | Ea                           | Ec            | Eb                        | Ec            |

| Kelas Risiko                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Tinggi Bendungan<br>$H \leq 15$ |                 | Tinggi Bendungan $H > 15$ |               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------|---------------------------|---------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | $a_d \geq 0,25g$                | $a_h > 0,25g$   | $a_d \leq 0,25g$          | $a_d > 0,25g$ |
| kerusakan tanpa III<br>keruntuhan (MDE) : IV                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Ea<br>Tidak ada                 | Ec<br>Tidak ada | Eb<br>Eb                  | Ec<br>Ec      |
| Catatan :<br>Ea = analisis menggunakan cara koefisien gempa<br>Eb = analisis menggunakan cara koefisien gempa termodifikasi<br>Ec = analisis dilakukan secara bertahap; dimulai dengan menggunakan cara koefisien gempa termodifikasi, jika faktor keamanan $\leq 1.00$ perlu dilanjutkan dengan analisis deformasi permanen yang menggunakan cara <i>Makdisi-Seed</i> dengan syarat deformasi tidak melebihi 50% dari tinggijagaan; jika tidak memenuhi syarat perlu dilanjutkan dengan analisis respons dinamik yang menggunakan cara elemen hingga. |                                 |                 |                           |               |

(Sumber : Pd t-14-2004-A, 2004)

#### 2.6.4 Analisis Koefisien Gempa

Gaya seismik horizontal dan vertikal dapat terjadi, meskipun gaya vertikal seringkali kurang kuat dan berbahaya dibandingkan gaya horizontal. Lokasi bangunan, yang diidentifikasi menggunakan peta zona gempa, memengaruhi besarnya koefisien seismik. Besar koefisien gempa dipengaruhi oleh lokasi konstruksi, yang ditetapkan berdasarkan peta zona gempa. Untuk mencari koefisien gempa di Persamaan (2.20), (2.21) dan (2.22) dibawah ini (Pd t-14-2004-A, 2004)

$$F = K.W \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

$$K_h = \frac{a_d}{g} \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

$$K = \alpha_1.K_h \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

dengan :

$F$  = gaya gempa mendatar (kN)

$W$  = berat (ton)

$K_h$  = koefisien gempa dasar yang tergantung pada periode ulang  $T$ ,

$a_d$  = percepatan gempa terkoreksi oleh pengaruh jenis tanah (gal)

$\alpha_1$  = koreksi pengaruh daerah bebas (*freefield*) untuk bendungan tipe urugan = 0,7

$K$  = koefisien gempa terkoreksi untuk analisis stabilitas

$g$  = gravitasi (980 cm/det<sup>2</sup>=9,81 m/det<sup>2</sup>)

#### 2.6.4.1 Koefisien gempa termodifikasi

Metode perhitungan koefisien gempa yang telah dijelaskan sebelumnya dinilai tidak lagi relevan sehingga perlu dilakukan modifikasi. Sebagai alternatif, digunakan pendekatan dari Jepang yang tertuang dalam *Seismic Design Guideline for Fill Dam* (Hernández et al., 2008), dengan koefisien gempa desain dinyatakan sebagai  $K_h = a_d/g$  sebagaimana dirumuskan pada Persamaan (2.21) dan (2.22). Nilai koefisien gempa untuk tubuh bendungan, yang dipengaruhi oleh kedalaman, selanjutnya dihitung menggunakan Persamaan (2.23).

$$K_o = \alpha_2 \times K_h \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

dengan :

$K_o$  = koefisien gempa desain terkoreksi dipermukaan tanah

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

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

Pada analisis stabilitas bendungan, nilai koefisien gempa bervariasi sesuai dengan kedalaman Y yang diukur dari puncak bendungan. Evaluasi dilakukan pada beberapa titik kedalaman, yaitu  $Y = 0,25H$ ;  $0,50H$ ;  $0,75H$ ; dan H, dengan H menunjukkan tinggi bendungan. Penentuan  $K_h$  menggunakan periode ulang gempa yang telah ditetapkan dalam pedoman. Selanjutnya, koefisien gempa rata-rata  $K$  pada setiap kedalaman tersebut dihitung berdasarkan Persamaan (2.24) dan (2.25).

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

$$k = K_o \times \{2,5 - 1,85 \times (Y/h)\} \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

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

$$k = K_o \times \{2,0 - 0,60 \times (Y/h)\} \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

Analisis stabilitas struktur dilakukan melalui pendekatan *limit equilibrium* dengan mempertimbangkan koefisien gempa  $K$ . Output dari perhitungan ini adalah nilai faktor keamanan.

## 2.7 Stabilitas Bendungan

### 2.7.1 Umum

Stabilitas bendung merupakan aspek perhitungan konstruksi yang bertujuan menilai kemampuan struktur dalam menahan berbagai beban eksternal, seperti angin, gempa bumi, maupun banjir besar. Persyaratan stabilitas mencakup kondisi lereng hulu dan hilir yang tidak rawan longsor serta perlindungan terhadap geseran, rembesan, maupun penurunan tubuh bendung.

Dalam perencanaan bendungan tipe urugan yang dirancang menahan volume air besar, faktor keamanan menjadi pertimbangan utama, khususnya terkait pengaruhnya terhadap kestabilan lereng. Salah satu kerentanan yang sering muncul adalah ketidakstabilan lereng, di samping potensi deformasi berlebih, tegangan tinggi, limpasan (*overtopping*), maupun erosi internal. Unsur-unsur ini berpotensi membahayakan keandalan bendungan baik dalam skenario beban umum maupun tidak umum.

Evaluasi stabilitas lereng umumnya dilakukan melalui tiga pendekatan utama, yaitu pengamatan visual, analisis berbasis komputasi, serta metode grafik.

### 2.7.2 Metode Morgenstern-Price

Metode (Price & Morgenstern, 1968), yang diperkenalkan oleh Price dan Morgenstern (1968), merupakan salah satu pendekatan berbasis prinsip keseimbangan batas. Analisis metode ini dilakukan dengan mempertimbangkan kesetimbangan gaya normal serta momen pada setiap irisan bidang kelongsoran lereng. Untuk menyederhanakan proses perhitungan, metode ini mengasumsikan adanya hubungan tertentu antara gaya geser antar irisan (X) dan gaya normal antar irisan (E), yang dinyatakan melalui Persamaan (2.26).

$$X = \lambda \cdot f(x) \cdot E \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

Pada Gambar 2.13 ditunjukkan gaya-gaya yang memengaruhi tiap irisan bidang kelongsoran. Persamaan yang relevan untuk menjelaskan kondisi tersebut disajikan sebagai berikut:

$$P = \frac{[Wn - (x_R - x_L) - \frac{1}{F}(c'(\sin \alpha - ul \tan \phi' \sin \alpha))]}{\cos \alpha \left( l + \tan \alpha \frac{\tan \phi'}{E} \right)} \quad \text{..... (2.27)}$$

dengan :

$P$  = gaya normal

$c'$  = kohesi (jika analisa dengan kondisi undrained diambil  $c_u$  jika dalam kondisi drained diambil nilai kohesi efektif)

$\phi'$  = sudut geser tanah (jika dalam kondisi undrained nilai sudut geser 0)

$\alpha$  = sudut diantara titik Tengah bidang irisan dengan titik pusat busur bidang longsor

$u$  = tekanan air pori

$X_L, X_R$  = gaya gesek yang bekerja ditepi irisan

Keseimbangan momen ( $F_m$ ) dan keseimbangan gaya ( $F_f$ ) adalah dua gagasan utama yang mendasari pendekatan ini dalam menganalisis faktor keamanan. Khususnya untuk permukaan longsor melingkar, faktor keamanan berbasis prinsip keseimbangan momen digunakan:

$$F_m = \frac{\sum (c'l + (p - ul) \tan \phi')}{\sum W \sin \alpha} \quad \text{..... (2.28)}$$

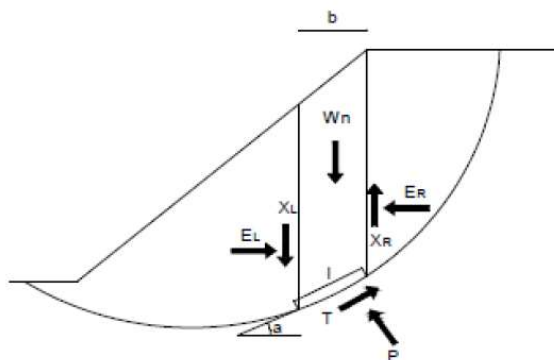
Dan nilai faktor keamanan dengan prinsip keseimbangan:

$$F_f = \frac{\sum [c'l + (p - ul) \tan \phi'] \cos \alpha}{\sum P \sin \alpha} \quad \text{..... (2.29)}$$

Pada proses iterasi pertama, gaya geser di sekitar irisan ( $X_L$  dan  $X_R$ ) diasumsikan nol. Kemudian pada proses iterasi selanjutnya gaya tersebut didapatkan Persamaan (2.30) :

$$(E_R - E_L) = P \sin \alpha \frac{1}{F} [c' + (P - ul) \tan \phi'] \cos \alpha \quad \text{..... (2.30)}$$

Kemudian gaya geser tersebut dihitung dengan mengasumsikan nilai  $\lambda$  dan  $f(x)$ .



**Gambar 2. 13** Gaya Pada Irisan Metode Morgenstern-Price  
(Sumber : Allan Takwin et al., 2017)

### 2.7.3 Kriteria Nilai Faktor Keamanan Stabilitas Bendungan

Kondisi keamanan bendungan dievaluasi melalui analisis stabilitas yang menghasilkan nilai Faktor Keamanan (FK). Mengacu pada (SNI 8064:2016) standar ini mengatur analisis stabilitas statis bendungan urugan beserta kriteria faktor keamanannya pada berbagai kondisi operasional. Rincian nilai FK tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.11 berikut:

**Tabel 2. 11** Kriteria Faktor Keamanan Minimum untuk Stabilitas Bendungan  
Tipe Urugan

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

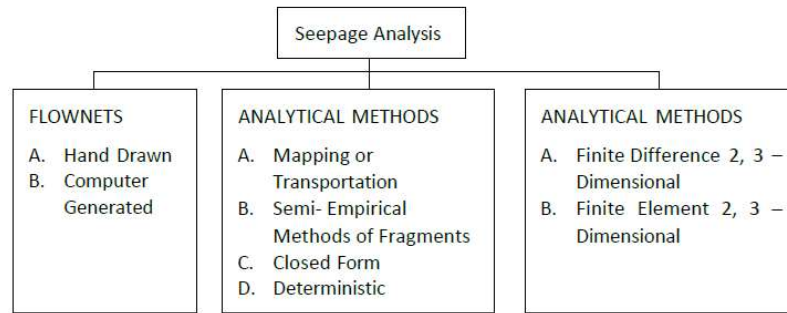
| NO                                                                                            | Kondisi                                                                                                                                                                                               | Kuat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

(Sumber : 8064:2016)

## 2.8 Analisa Rembesan

### 2.8.1 Metode Analisa

Penyelesaian untuk kondisi seepage konstan untuk aliran laminar. Di bawah ini adalah persamaan untuk berbagai kasus rembesan.



**Gambar 2. 14** Beberapa Metode Analisa Rembesan

(Sumber : Balai Bendungan, 2010)

Sebelum pelaksanaan analisis rembesan, perlu disusun terlebih dahulu rencana analisis yang mencakup beberapa tahapan, yaitu:

1. Uraian singkat mengenai maksud serta tujuan analisis.
2. Pemilihan metode analisis yang sesuai.
3. Penetapan kondisi yang akan ditinjau, meliputi:
4. Kondisi yang akan dianalisa yaitu:
  - a. Karakteristik lokasi penelitian
  - b. Parameter yang dijadikan variable
  - c. Data material yang dipakai dalam perhitungan, serta
  - d. Parameter yang akan dipake sebagai variasi
  - e. Jenis hasil kuantitatif yang diharapkan.

Panduan terkait penerapan berbagai metode analisis rembesan ditunjukkan Tabel 2.12 berikut.

**Tabel 2. 12** Petunjuk Penggunaan Beberapa Metode Analisa Rembesan

| Situasi                                                              | Investigasi Tipikal                                                  | Metode Analisis                        |
|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Timbunan homogin, pondasi kedap air, kondisi <i>steady</i> 2 - D     | Muka air freatik, tekanan air pori, gaya perembesan air (stabilitas) | Cassagrande grafis atau <i>flownet</i> |
| Timbunan zonal, pondasi kedap air, kondisi <i>steady</i> 2- D        | Muka air freatik, tekanan air pori, gaya perembesan air (stabilitas) | <i>Flownet</i> atau model numerik      |
| Timbunan homogin, pondasi porus seragam, kondisi <i>steady</i> 2 - D | Muka air freatik, tekanan air pori, gaya rembesan (stabilitas)       | <i>Flownet</i> atau model numerik      |
|                                                                      | Gradien keluaran, debit rembesan                                     |                                        |

| Situasi                                                                                                                                             | Investigasi Tipikal                                                                                                                                                            | Metode Analisis                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                     | Alternatif kontrol rembesan, variasi sifat material                                                                                                                            |                                                                                 |
| Timbunan Zonal, pondasi porus, kondisi <i>steady</i> 2 -D                                                                                           | Sama dengan atas                                                                                                                                                               | Model Numerik                                                                   |
| Melibatkan relief wells, fondasi heterogin, kuasi 3-D, kondisi <i>steady</i>                                                                        | Muka air preatik, tekanan air pori, <i>gradient</i> keluaran, debit rembesan, <i>alternative control</i> rembesan, variasi sifat material, spasi relief <i>well</i> dan aliran | Model Numerik                                                                   |
| Tumpuan pervious, Kondisi <i>steady</i> 3 -D                                                                                                        | Muka air preatik, debit rembesan                                                                                                                                               | <i>Flownet</i>                                                                  |
| Fondasi dan tumpuan pervious heterogin, kondisi <i>steady</i> 3 -D                                                                                  | Muka air preatik, debit rembesan, gradien keluaran, jenis material dan alternatif kontrol rembesan                                                                             | Model Numerik                                                                   |
| Aliran transient 2 -D, kondisi batas <i>steady</i>                                                                                                  | Penjenuhan, waktu untuk mencapai kondisi <i>steady</i>                                                                                                                         | <i>Flownet</i> transien                                                         |
| Situasi 2-D aliran <i>nonsteady</i> , zona jenuh/tak jenuh atau timbunan homogen. Pondasi heterogen, kondisi batas transient, kondisi transient 2-D | Pengisian pertama, operasi waduk, perubahan kadar air dan perubahan tekanan air pori, pengaruh presipitasi dan evaporasi                                                       | Model numerik (lihat <i>Groundwater</i> modelling Herbert F., Anderson, Mary P) |

(Sumber : Direktorat Sungai Danau dan Waduk, Desember 2005).

## 2.8.2 Pemodelan *Finite Element*

*Finite Element* (Elemen Hingga) adalah sebuah metode numerik yang dipakai untuk mengkaji secara rinci perilaku struktur bendungan. Pendekatan ini memecah bendungan menjadi sejumlah elemen kecil, kemudian menghitung respon tiap elemen terhadap berbagai beban, seperti tekanan air, gaya gempa, atau berat struktur itu sendiri. Dengan metode ini, perilaku bendungan dalam berbagai kondisi termasuk stabilitas lereng, distribusi tegangan, deformasi, serta potensi kerusakan-dapat dimodelkan dan diprediksi secara akurat. Teknik *Finite Element* sering diaplikasikan melalui perangkat lunak rekayasa sipil guna mendukung perancangan dan penilaian keamanan bendungan.

### 2.8.2.1 Program SEEP/W

SEEP/W merupakan perangkat lunak analisis berbasis metode elemen hingga yang dirancang untuk mempelajari aliran air pada media berpori, baik tanah maupun batuan. Aplikasi ini memungkinkan pemodelan aliran pada kondisi jenuh maupun

tidak jenuh, serta memberikan gambaran visual mengenai posisi garis freatik berdasarkan parameter koefisien permeabilitas material.

#### 2.8.2.2 Program SLOPE/W

SLOPE/W merupakan program analisis berbasis metode elemen hingga dengan teori keseimbangan batas digunakan oleh program analisis stabilitas lereng untuk menentukan faktor keamanan. Program ini menyediakan sejumlah metode perhitungan, seperti Fellenius, Bishop, Janbu, dan Spencer, sehingga pengguna dapat memilih metode yang paling sesuai dengan kebutuhan analisis mereka. Karakteristik kuat geser tanah (kohesi dan sudut gesek), berat jenis, kondisi tekanan air pori, dan beban eksternal merupakan beberapa data masukan yang secara signifikan memengaruhi keakuratan hasil.

### 2.9 Penelitian Terdahulu

Berdasarkan tinjauan penelitian terdahulu yang dirangkum pada Tabel 2.13, terlihat bahwa kajian serupa telah dilakukan di berbagai lokasi dengan kondisi yang berbeda. Penelitian ini difokuskan untuk menganalisis stabilitas bendungan terhadap besarnya debit rembesan dan potensi *pipings* menggunakan perangkat SEEP/W serta mengevaluasi stabilitas lereng bendungan melalui SLOPE/W. Selain itu, dilakukan perbandingan efektivitas antara pemasangan *curtain grouting* dan *cut off wall* sebagai dasar pertimbangan peningkatan keamanan tubuh bendungan.

**Tabel 2. 13 Penelitian Terdahulu**

| No. | Penulis                                                                | Judul                                                                                                                    | Tujuan                                                                                                                                                                                                                                                         | Metode                                                                                                                                          | Hasil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Anwar, Miftachul, Pratikso Pratikso, And Hermin Poedjiastoeti. (2025). | Evaluasi Stabilitas Lereng Dan Dinding Pada Pelaksanaan Konstruksi Bangunan Pelimpah Bendungan Jragung Jawa tengah       | Menganalisis data bor BSP untuk mengetahui jenis batuan, mengevaluasi stabilitas lereng dan dinding pelimpah dengan software Geo5 v20 berdasarkan desain tahun 2019, serta merancang lereng dan dinding yang sesuai dengan kondisi geologi di lokasi.          | Analisis program Geo5 v20                                                                                                                       | Hasil analisis menunjukkan bahwa stabilitas lereng dan dinding pelimpah pada desain awal belum memenuhi standar keamanan ( $FK < 1,5$ ). Setelah lereng dilandaikan menjadi 1:1, Faktor Keamanan meningkat dan sudah memenuhi standar. Kondisi batuan di lokasi yang mudah lapuk tidak mampu mendukung lereng curam 1:0,8, sehingga perubahan desain perlu dilakukan untuk menjaga kestabilan dan keamanan bangunan. |
| 2   | Ollong, Niqmah Fatmasari, and Nur Nazmi Lael Fadillah. (2024).         | Analisa Keamanan Lereng Bendung Pada Kondisi <i>Rapid Drawdown</i> Menggunakan Dua Perangkat Lunak Metode Elemen Hingga. | Menganalisa perbandingan pemodelan <i>Rapid Drawdown</i> dan faktor keamanan terhadap lereng bendung pada Plaxis 2D V20 dan Geostudio 2018 R2                                                                                                                  | Analisis program plaxis 2D V20 dan (Geostudio 2018 R2)                                                                                          | Analisis stabilitas lereng bendungan menggunakan Plaxis 2D V20 dan Geostudio 2018 R2 menunjukkan bahwa kondisi paling tidak aman terjadi saat rapid drawdown selama 5 hari. Pada kondisi ini, nilai faktor keamanan terendah adalah 0,830 (Geostudio) dan 1,015 (Plaxis), berdasarkan analisa garis freatik dan tekanan air pori berlebih                                                                            |
| 3   | Rovik, (2024)                                                          | Kajian Penempatan Piezometer Melalui Simulasi Potensi Rembesan Pada Bendungan Jragung.                                   | Mengevaluasi keamanan bendungan terhadap rembesan dan <i>piping</i> , menentukan ukuran optimal bangunan V-notch dari hasil analisis, serta menetapkan lokasi dan jumlah piezometer yang paling efektif dan efisien untuk dipasang pada bendungan atau tanggul | Analisis program Seep/W(Geo Studio) , Piezometer tipe W9 <i>vibrating wire</i> piezometer (SN 078205), unit alat baca AVW200 <i>data logger</i> | Hasil yang diperoleh dari Analisa tersebut struktur timbunan Bendungan Jragung aman terhadap debit rembesan dan erosi buluh. Sedangkan untuk penempatan profil memanjang berdasar kondisi geologi terdapat 4 titik pemantauan yaitu pada STA 250, 500, 900 dan STA 1200.                                                                                                                                             |

| No. | Penulis                                              | Judul                                                                                                             | Tujuan                                                                                                                                                                                           | Metode                                                                                                             | Hasil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4   | Nurokhmah, Silfiana, and Salma Ula Farrasati. (2023) | Analisa Rembesan Dengan Menggunakan Program Numerik Pada Bendungan Jragung Kabupaten Semarang.                    | Menganalisa arah debit rembesan ( <i>seepage</i> ) dan faktor keamanan terhadap bahaya rembesan pada model timbunan dengan menggunakan program SEEP/W (Geostudio 2018 R2) dan program plaxis 8.6 | Analisis program (Geostudio 2018 R2) dan program plaxis 8.6                                                        | Hasil pemodelan Geostudio 2018 R2 menunjukkan faktor keamanan di hilir meningkat dari 1,495 menjadi 1,857 setelah <i>grouting</i> , dan di hulu dari 2,030 menjadi 2,811. Sementara itu, analisis dengan Plaxis 8.6 pada kondisi rembesan <i>steady-state</i> menunjukkan faktor keamanan naik dari 1,320 menjadi 1,8924 setelah <i>grouting</i> .                                                                                                                |
| 5   | Miftahudin, Fatahillah Noor. (2023)                  | Analisis Stabilitas Dan Rembesan Pada Tubuh Bendung Dengan Variasi Elevasi Tinggi Muka Air.                       | Mengetahui kondisi rembesan dan <i>piping</i> yang aman jika terjadi ketinggian air normal, banjir, atau ketinggian air minimal akibat tekanan <i>seismic</i> gempa.                             | Pemodelan software GeoStudio 2012, menggunakan program analisis SEEP/W dan SLOPE/W.                                | Berdasarkan hasil studi yang dilakukan menggunakan GeoStudio 2012 sesuai SNI 8064:2016, Bendungan Kedung Brubus aman dari rembesan, tetapi tidak aman dari pipa. Sementara itu, Bendungan Kedung Brubus stabil baik di bawah beban gempa OBE maupun MBE, maupun saat tidak ada beban gempa.                                                                                                                                                                       |
| 6   | Saidillah, Muhammad. (2021)                          | Analisis Rembesan Dan Stabilitas Bendungan Saradan ( <i>Seepage Analysis And Slope Stability Of Saradan Dam</i> ) | Menganalisis menggunakan program GeoStudio 2012 untuk mengetahui rembesan dan stabilitas bendungan Saradan pada kondisi muka air banjir, normal, minimum, dan saat surut cepat.                  | Pemodelan software GeoStudio 2012, menggunakan program analisis SEEP/W dan SLOPE/W dengan beban gempa OBE dan MDE. | Berdasarkan analisis yang dilakukan dengan GeoStudio 2012, stabilitas Bendungan Saradan pada dasarnya aman. Nilai Faktor Keamanan (FK) memenuhi persyaratan keamanan untuk kondisi banjir, normal, dan minimum, baik saat tidak terjadi gempa bumi maupun saat terjadi gempa bumi OBE dan MDE. Meskipun FK aman saat surut cepat dan saat terjadi gempa bumi OBE, FK menjadi berbahaya saat terjadi gempa bumi MDE karena nilainya berada di bawah batas minimum. |

| No. | Penulis                                    | Judul                                                                                           | Tujuan                                                                                                                                                                                                                                                                                | Metode                                                                                                                                                                    | Hasil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 8   | Hidayawan & Hikmatyar, (2022)              | Fungsi <i>Grouting</i> terhadap Bahaya Rembesan, <i>Piping</i> dan <i>Uplift</i> pada Bendungan | Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis efektivitas perbaikan pondasi melalui metode <i>grouting</i> dalam upaya mengurangi nilai permeabilitas pondasi pada kondisi geologi yang ada, dengan melakukan variasi kedalaman <i>grouting</i> sebesar 40 meter dan 50 meter. | Pemodelan menggunakan software untuk menganalisis efektivitas perbaikan pondasi                                                                                           | Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada Bendungan Jragung direncanakan pelaksanaan pekerjaan <i>grouting</i> yang meliputi curtain, subcurtain, dan <i>blanket grouting</i> . Analisis yang dilakukan menunjukkan bahwa desain <i>grouting</i> tersebut mampu meningkatkan aspek keamanan bendungan terhadap potensi bahaya rembesan, <i>piping</i> , dan tekanan angkat ( <i>uplift</i> ) |
| 9   | Rahayu, Rifan, and Sulwan Permana. (2021). | Analisis Kestabilan Lereng Bendungan Akibat Fluktuasi Muka Air.                                 | Menganalisis nilai faktor keamanan lereng untuk mendapatkan informasi terkait kondisi -kondisi stabilitas lereng untuk pembangunan Bendungan.                                                                                                                                         | Analisis dengan metode Bishop                                                                                                                                             | Berdasarkan hasil penelitian dari ketiga kondisi lereng, nilai <i>factor</i> keamanan yang stabil dan aman terhadap bahaya longsoran. Sedangkan potensi longsoran yang akan terjadi akan mengalami longsoran dengan tipe translasi karena perbedaan kuat geser dan perbedaan lapisan pada susunan timbunan pada bendungan utama.                                                           |
| 10  | Arifin, (2021)                             | Analisa Pengaruh Pemasangan Pengendalian Rembesan Tambahan Terhadap Stabilitas Bendungan        | Mengetahui perbandingan kondisi keamanan tanpa pemasangan pengendalian dan dengan pemasangan pengendalian rembesan tambahan <i>cut off wall</i> , <i>curtain grouting</i> dan <i>upstream blanket</i> terhadap batas izin besaran rembesan dan <i>safety factor piping</i> .          | Pemodelan menggunakan Software Seep/W 2012 pada model pemasangan pengendalian rembesan tambahan <i>cut off wall</i> , <i>curtain grouting</i> dan <i>upstream blanket</i> | Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemasangan <i>curtain grouting</i> 30 m merupakan alternatif yang paling efektif untuk mengurangi rembesan hingga 67.82%.                                                                                                                                                                                                                               |

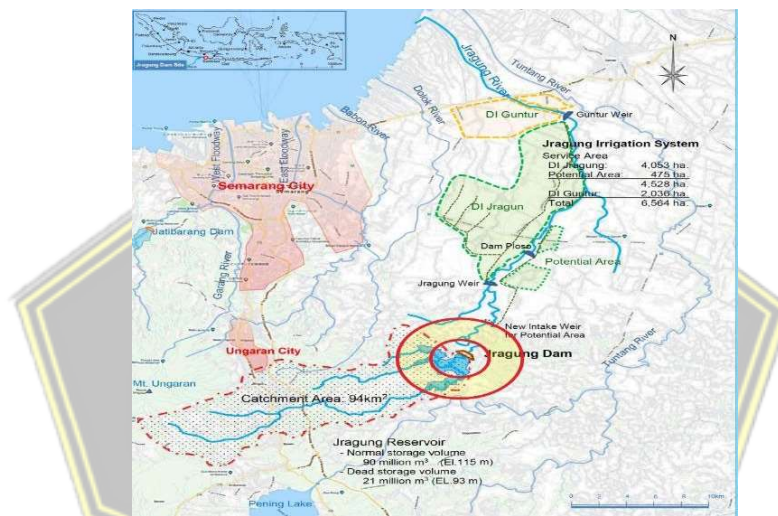
| No. | Penulis                                                              | Judul                                                                                                   | Tujuan                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Metode                                                                                                                                                                                                | Hasil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11  | Setyawati, Heni, Najib Najib, and Ahmad Syauqi Hidayatillah. (2018). | Analisis Rembesan Pada Perencanaan Pembangunan Bendungan Logung, Kabupaten Kudus, Jawa Tengah.          | Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai faktor keamanan bendungan terhadap bahaya <i>piping</i> , sekaligus menyusun rekomendasi teknis yang dapat meningkatkan faktor keamanan pada Bendungan Logung.                                                                                                                                          | Dilakukan uji lab untuk mengetahui <i>specific gravity</i> dan <i>void ratio</i> , lalu dimodelkan dengan Slide v6.0.                                                                                 | Batuan penyusun bawah permukaan daerah penelitian berupa batupasir tufan dan tufa. Pelaksanaan <i>grouting</i> terbukti menurunkan debit rembesan pada kondisi muka air normal maupun banjir sebesar $\pm 5 \text{ m}^3/\text{hari}$ ( $\pm 0,6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{dtk}$ ). Selain itu, faktor keamanan <i>piping</i> Bendungan Logung meningkat signifikan, dari 1,38 sebelum <i>grouting</i> menjadi 4,77 setelah <i>grouting</i> .                                                                                                                                                                                                                  |
| 12  | Astuti, (2012)                                                       | Analisa rembesan Bendungan Bajulmati terhadap bahaya <i>piping</i> untuk perencanaan perbaikan pondasi. | Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kestabilan Bendungan Bajulmati terhadap rembesan dan potensi <i>piping</i> , baik pada kondisi tanpa perbaikan pondasi maupun dengan alternatif perbaikan berupa curtain <i>grouting</i> dan cut-off wall, dengan kriteria faktor keamanan lebih dari 4 dan debit rembesan kurang dari 2% limpasan tahunan rata-rata. | <i>Analisis pemodelan menggunakan software SEEP/W mencakup penerapan alternatif pengendalian rembesan, yaitu sementasi tirai (grouting), cutoff wall, dan alas kedap air hulu (upstream blanket).</i> | Hasil analisis menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa perbaikan pondasi, faktor keamanan terhadap <i>piping</i> bernilai 2,11. Dengan penerapan perbaikan berupa sementasi tirai dan cutoff wall, faktor keamanan meningkat signifikan menjadi 10,60, sedangkan pada alternatif alas kedap air hulu diperoleh nilai 2,65. Dari sisi kuantitas, debit rembesan mengalami penurunan sebesar 68,00%–94,73% untuk sementasi tirai, 94,87%–99,39% untuk cutoff wall, dan 0,45%–0,71% untuk alas kedap air hulu. Dengan demikian, perbaikan pondasi menggunakan cutoff wall dinilai paling efektif dalam mengurangi kebocoran waduk sekaligus menekan risiko <i>piping</i> . |

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada di Bendungan Jragung, Jawa Tengah, tepatnya di Dusun Kedung Glatik, Desa Candirejo, Kecamatan Pringapus, Kabupaten Semarang. Secara astronomis, posisi bendungan ini berada pada koordinat  $110^{\circ}21'57''$ – $110^{\circ}39'58''$  Bujur Timur dan  $6^{\circ}50'55''$ – $7^{\circ}13'59''$  Lintang Selatan.



**Gambar 3. 1** Peta Lokasi Penelitian

#### 3.2 Alat dan Bahan

Untuk mendukung proses analisis, studi ini menggunakan kombinasi dari studi pustaka dan studi lapangan guna pengumpulan dan mengolah data. Dan untuk mempermudah dalam proses analisis peneliti menggunakan bantuan program berbasis *Finite Element* yang digunakan untuk melakukan analisis stabilitas dan rembesan dalam penelitian ini.

#### 3.3 Keperluan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan memanfaatkan data primer sebagai dasar utama penelitian, serta data sekunder sebagai penunjang.

### 3.3.1 Data Primer

Data primer pada penelitian ini diperoleh secara langsung dari proyek pembangunan Bendungan Jragung. Pengumpulan data dilakukan melalui wawancara dan diskusi dengan instansi maupun tenaga ahli, yang meliputi informasi perencanaan, pelaksanaan, serta dokumen administratif untuk mendukung analisis.

### 3.3.2 Data Sekunder

Data sekunder yakni data yang diperoleh secara tidak langsung. Jenis data ini dikumpulkan dari berbagai dokumen proyek, laporan teknis, serta literatur seperti jurnal yang relevan guna mendukung pelaksanaan penelitian. Adapun untuk data-data tersebut terdiri dari :

#### 3.3.2.1 Data teknis bendungan

##### 1. Main dam

- Nama sungai : Sungai jragung
- Panjang sungai : 35 Km
- Curah hujan rerata tahunan : 2.479 mm
- Inflow rerata tahunan : 114 Juta m<sup>3</sup>
- DAS jragung : 94 Km<sup>2</sup>
- Luas tampungan normal : 451 Ha
- Luas tampungan maksimum : 503 Ha
- Volume tampungan total : 90 Juta m<sup>3</sup>
- Volume tampungan efektif : 69 Juta m<sup>3</sup>
- Volume tampungan mati : 21 Juta m<sup>3</sup>
- Elevasi muka air normal : +115 m
- Elevasi muka air banjir (Q1000) : + 117,28 m
- Elevasi muka air banjir (QPMF) : +118,65 m
- Tipe : Urugan Zonal Inti Tegak
- Elevasi puncak bendungan : +119,5 m
- Elevasi dasar pondasi : + 60,0 m
- Tinggi bendungan : 59,5 m

- Lebar puncak bendungan : 10 m
- Panjang puncak bendungan : 1.350 m
- Kemiringan lereng bagian hulu : 1 : 2,5
- Kemiringan lereng bagian hilir : 1 : 2,25

## 2. Intake

- Tinggi Menara intake : 51,70 m
- Panjang pondasi : 22 m
- Lebar pondasi : 17 m

## 3. Spillway

### Mercu

- Tipe : Pelimpah bebas
- Tipe ambang : Ogee tipe II
- Elevasi ambang : + 115 m
- Tinggi jagaan total : 4,50 m
- Lebar ambang pelimpah : 6 m bentuk lengkung
- Anjang mercu : 12,30 m
- Anjang pelimpah : 439 m

### Peredam energi

- Tipe : USB tipe II
- Panjang : 30 m
- Tinggi saluran : 16 m
- Lebar saluran : 30 m
- Elevasi dasar saluran : + 44,5 m

## 4. Bangunan Pengelak

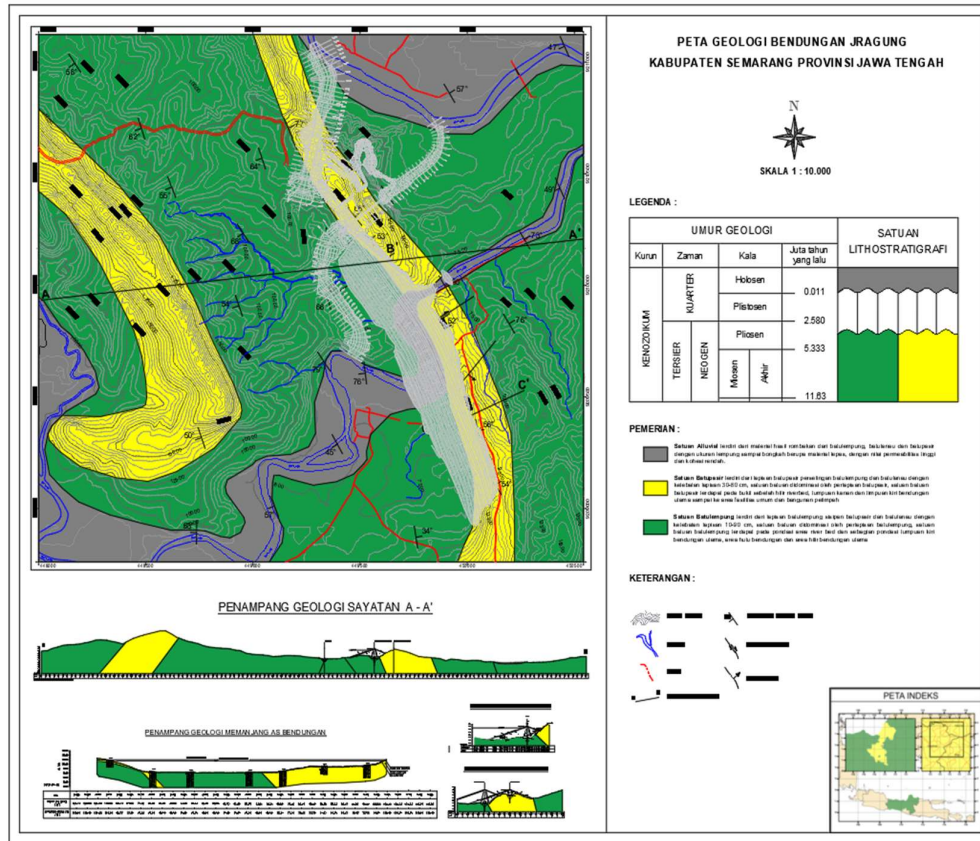
- Panjang inlet : 465 m
- Panjang tunnel : 380 m
- Panjang outlet : 470 m
- Panjang total : 1.315 m

### 3.3.2.2 Geologi bendungan jragung

Lokasi Bendungan Jragung terletak pada Zona Kendeng yang merupakan antiklinorium yang dikontrol oleh struktur geologi. Struktur geologi wilayah proyek sangat kompleks diantaranya struktur geologi kekar, lipatan, dan sesar (rekahan) yang terdiri dari lapisan batulempung, batupasir, dan bahan klastik gunung berapi.

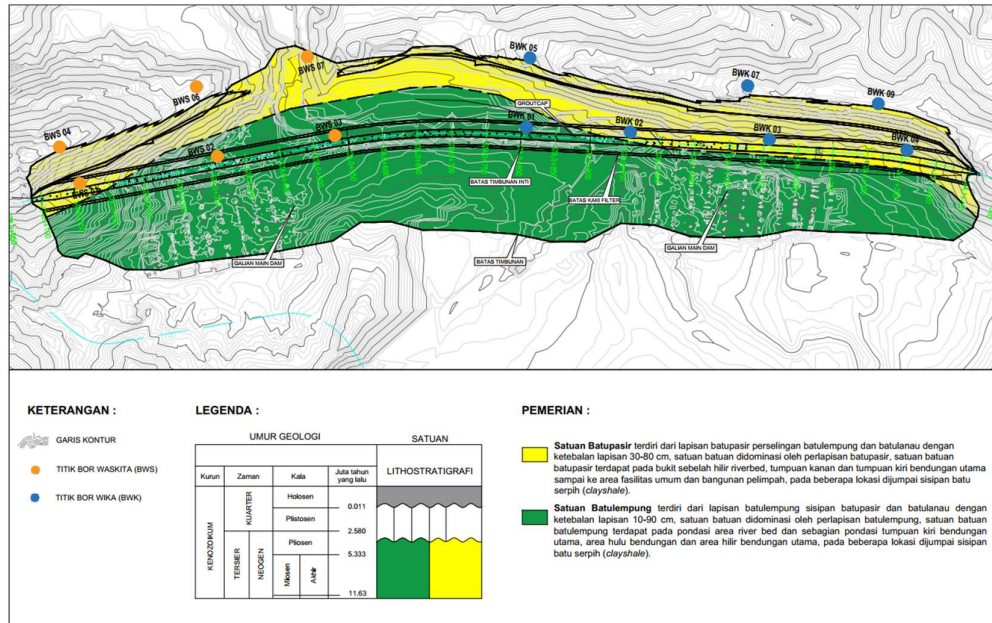
Dalam pemetaan geologi Bendungan Jragung memiliki 3 (tiga) satuan batuan alluvial, satuan batupasir, dan satuan batulempung, diantaranya sebagai berikut:

1. Satuan Alluvial terdiri dari material hasil rombakan dari batulempung, batulanau dan batupasir dengan ukuran lempung sampai bongkah berupa material lepas, dengan nilai permeabilitas tinggi dan kohesi rendah.
2. Satuan Batupasir terdiri dari lapisan batupasir perselingan batulempung dan batulanau dengan ketebalan lapisan 30-80 cm, satuan batuan didominasi oleh perlapisan batupasir, satuan batuan batupasir terdapat pada bukit sebelah hilir *riverbed*, tumpuan kanan dan tumpuan kiri bendungan utama sampai ke area fasilitas umum dan bangunan pelimpah.
3. Satuan Batulempung terdiri dari lapisan batulempung sisipan batupasir dan batulanau dengan ketebalan lapisan 10-90 cm, satuan batuan didominasi oleh perlapisan batulempung, satuan batuan batulempung terdapat pada pondasi area *river bed* dan sebagian pondasi tumpuan kiri bendungan utama, area hulu bendungan dan area hilir bendungan utama.

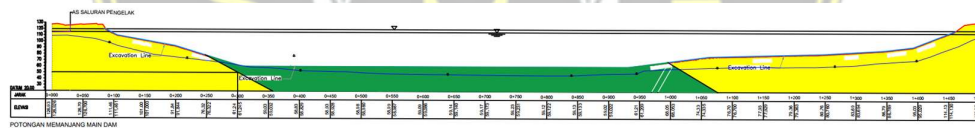


**Gambar 3. 2** Peta Geologi Bendungan Jragung  
(Sumber : Laporan Akhir Pekerjaan Geologi Bendungan, 2022)

Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan dapat diketahui bahwa kondisi geologi tapak bendungan dapat dijelaskan menjadi 2 bagian yaitu sandaran kiri (STA. 0+000 – 0+500) dan sandaran kanan (STA. 0+500 – 1+450). Masing-masing bagian fondasi memiliki kondisi geologi yang *relative* sama yaitu tersusun atas 2 satuan batuan. Satuan batuan yang pertama berupa satuan batulempung sisipan batulanau dan batupasir, sedangkan satuan batuan yang kedua yaitu satuan batupasir sisipan batulempung dan batulanau. Pelaparan dari satuan batulempung sisipan batulanau dan batupasir pada area hulu dan *riverbed* sedangkan pelamparan dari satuan batupasir sisipan batulempung dan batupasir berada pada bagian hilir dan sandaran tebing maindam. Untuk mengetahui lebih detilnya dapat dilihat pada Gambar 3.3 (Peta Geologi Area Tapak Bendungan) sebagai berikut :



**Gambar 3. 3** Peta Geologi Tapak Bendungan  
(Sumber : Laporan Akhir Pekerjaan Geologi Bendungan, 2022)



**Gambar 3. 4** Penampang Memanjang Geologi Pondasi Bendungan Utama  
(Sumber : Laporan Akhir Pekerjaan Geologi Bendungan, 2022)

### 3.3.2.3 Data parameter tanah pada timbunan

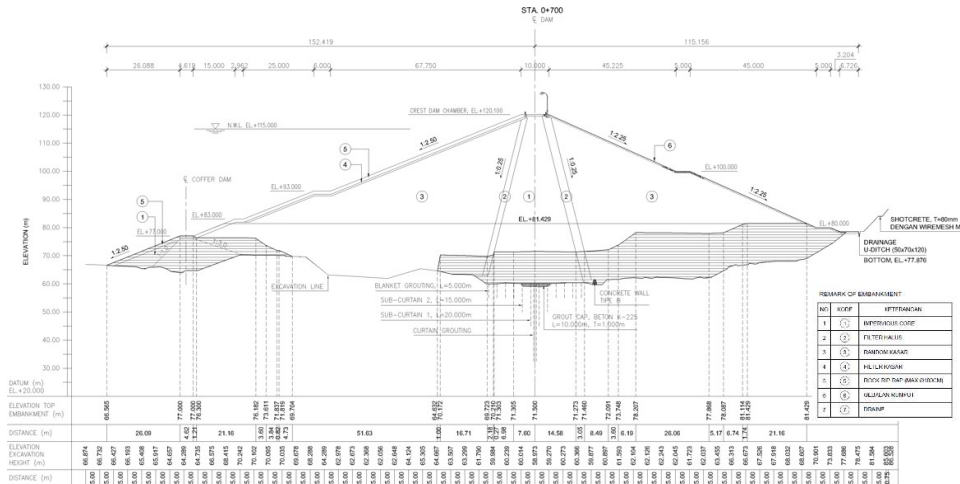
Adapun untuk data parameter tanah pada timbunan utama yang akan dianalisa, terdapat pada Tabel 3.1 berikut ini:

**Tabel 3. 1** Parameter Timbunan

| No. | Material            | $\gamma_{wet}$     | $\gamma_{sat}$     | C                  | $\phi$ | C'                 | $\phi'$ | e     | E         | K (permeability) | Remark           |
|-----|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------|--------------------|---------|-------|-----------|------------------|------------------|
|     |                     | gr/cm <sup>3</sup> | gr/cm <sup>3</sup> | kg/cm <sup>2</sup> | -      | kg/cm <sup>2</sup> | -       | -     | Kpa       | cm/det           |                  |
| 1   | Zona 1 (Inti)       | 1.87               | 1.82               | 17                 | 18.6   | 0.05               | 28      | 1.16  | 17,000    | 1.74E-06         | PT Konas Tunggal |
| 2   | Zona 2 ( Filter)    | 1.89               | 2.18               | 0                  | 36     |                    |         | 0.487 | 50,000    | 3.86E-03         | IKA 18           |
| 3   | Zona 3 (Random)     | 1.88               | 1.99               |                    |        | 0                  | 33.0    | 0.772 | 40,000    | 1.02E-03         |                  |
| 4   | Zona 4 (transisi)   | 2.18               | 2.01               | 0.15               | 36.0   |                    |         | 0.75  |           | 4.18E-03         | IKA 18           |
| 5   | Zona 5 (Rip rap)    | 2.48               | 2.36               | 0                  | 40.0   |                    |         |       |           | 1.00E-02         |                  |
| 6   | Beton               | 2.45               | 2.32               | 100                | 45     |                    |         |       | 6,877,278 | 1.50E-10         |                  |
| 7   | Curtain grouting    | 1.825              | 1.985              | 10                 | 42     |                    |         |       |           | 1.52E-07         | WPT              |
| 8   | Pondasi Batupasir   | 1.963              | 2.079              | 11.79              | 48.7   |                    |         | 0.681 | 1,206,528 | 2.57E-04         | PUSAIR           |
| 9   | Pondasi Batulempung | 1.753              | 1.875              | 1.32               | 42.06  |                    |         | 0.778 | 678,167   | 4.41E-04         | PUSAIR           |

### 3.3.2.4 Data geometri tubuh bendungan

Adapun untuk data geometri tubuh Bendungan utama yang akan dianalisa, pada Gambar 3.5 :



Gambar 3.5 Gambar Potongan Melintang STA + 700

### 3.4 Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data didapatkan dari Proyek Pembangunan Bendungan Jragung yang berada di Kabupaten Semarang. Fungsi dari pengumpulan data ini adalah sebagai proses analisis nilai debit rembesan dan statistik faktor keamanan rembesan di Bendungan Jragung. Data dan informasi yang digunakan diperoleh melalui data sekunder dari instansi atau pihak terkait, kemudian dianalisis dalam penelitian Tugas Akhir ini.

### 3.5 Analisis Data

Untuk mempermudah proses pengolahan data, diperlukan penerapan pendekatan ilmiah yang sistematis. Pencapaian tujuan penelitian ini didasarkan pada rujukan dari berbagai studi sebelumnya serta didukung oleh landasan ilmiah yang relevan.

Adapun untuk melakukan proses analisis data, berikut metode untuk mendapatkan hasil dari penelitian ini :

1. Metode Casegrande

Penerapan metode ini bertujuan menganalisis aliran rembesan pada tubuh bendungan dan memprediksi pembentukan garis depresi (*seepage line*).

2. Metode Morgenstern-Price

Penerapan metode ini digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng dan untuk menghitung faktor keamanan (*safety factor*) lereng.

3. Metode pemodelan *Finite Element*.

Penggunaan teknik pemodelan bertujuan untuk mengevaluasi perilaku keseluruhan struktur bendungan melalui analisis stabilitas menggunakan program SLOPE/W dan perhitungan rembesan menggunakan perangkat lunak SEEP/W.

### 3.6 Tahapan Penelitian

Untuk melaksanakan analisis ini, pemodelan tubuh bendungan dilakukan melalui beberapa tahapan umum, yaitu:

1. Menyiapkan data model yang mencakup geometri tipikal bendungan, data geologi, dan data teknis.
2. Melakukan analisis rembesan tanpa perbaikan pengendalian tambahan.
3. Menentukan alternatif perbaikan pengendalian tambahan.
4. Melaksanakan analisis stabilitas dan rembesan dengan program berbasis *finite element*.
5. Menentukan nilai *safety factor*.
6. Membandingkan hasil analisis yang diperoleh.
7. Menyusun kesimpulan serta rekomendasi.

#### 3.6.1 Langkah-langkah Pemodelan SEEP/W

Langkah-langkah pemodelan dengan program SEEP/W berbasis finite element dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Menyiapkan data geometri tipikal bendungan.
2. Menentukan skala dan units serta tata letak grid untuk membatasi area pemodelan, sekaligus menetapkan dimensi terkecil yang digunakan dalam penggambaran.

3. Masukkan koordinat x dan y untuk membuat model geometris bendungan. Kemudian, hubungkan titik-titik tersebut untuk membuat bentuk badan bendungan.
4. Memasukkan materials, parameter hydraulic conductivity dan pF ke dalam model melalui fungsi input langsung (klik in).
5. Menggunakan perintah drag untuk membagi geometri menjadi beberapa elemen, lalu melanjutkan pembagian hingga seluruh elemen terbentuk.
6. Menggunakan perintah *boundary conditions* sebagai langkah penting sebagai batasan analisis pemodelan yang menggambarkan kondisi air.
7. Gunakan menu gambar untuk menggambar arah aliran, dengan menentukan jalur aliran pada sketsa bendungan dari bawah ke atas.
8. Verifikasi dan urutkan data untuk memastikan keakuratan, dan periksa kembali jika ada kesalahan.
9. Menjalankan analisis dengan perangkat lunak melalui perintah *solve* untuk memperoleh hasil perhitungan pada setiap elemen model.
10. Menggunakan menu *contour* untuk menampilkan hasil *running* dalam bentuk kontur.

### 3.6.2 Langkah-langkah Permodelan SLOPE/W

Berikut ini adalah tahapan yang terlibat dalam pemodelan dengan program SLOPE/W berbasis *finite element*:

1. Melakukan pengaturan awal pada fitur *KeyIn Analysis* untuk menentukan bidang keruntuhan serta jenis *slip surface* yang digunakan.
2. Mengatur tinggi dan lebar model dengan perintah *SetPage*.
3. Menentukan satuan dan skala gambar melalui *SetUnits* dan pengaturan skala.
4. Menggunakan *SetGrid* untuk mengatur jarak *grid* antar titik sehingga memudahkan proses penggambaran.
5. Menggambar sumbu x dan y pada area kerja dengan fitur *Sketch Axes*.
6. Membuat geometri lereng melalui menu *Sketch* → *Polylines*, sesuai data sekunder yang tersedia.
7. Memasukkan parameter tanah menggunakan menu *KeyIn Materials*, meliputi berat isi tanah ( $\gamma$ ), kohesi ( $c$ ), dan sudut geser dalam ( $\phi$ ).

8. Melakukan penggambaran material pada model geometri lereng dengan perintah *Draw Material* setelah parameter dimasukkan.
9. Menambahkan input *Grid and Radius* di sepanjang area yang akan dianalisis.
10. Melakukan verifikasi terhadap seluruh data yang telah diinput sebelum analisis.
11. Menjalankan analisis dengan memilih *Tools* → *Solve Analysis* → *Start* untuk menghitung faktor keamanan (*Safety Factor/SF*).
12. Setelah proses selesai, program menghasilkan output berupa nilai faktor keamanan.

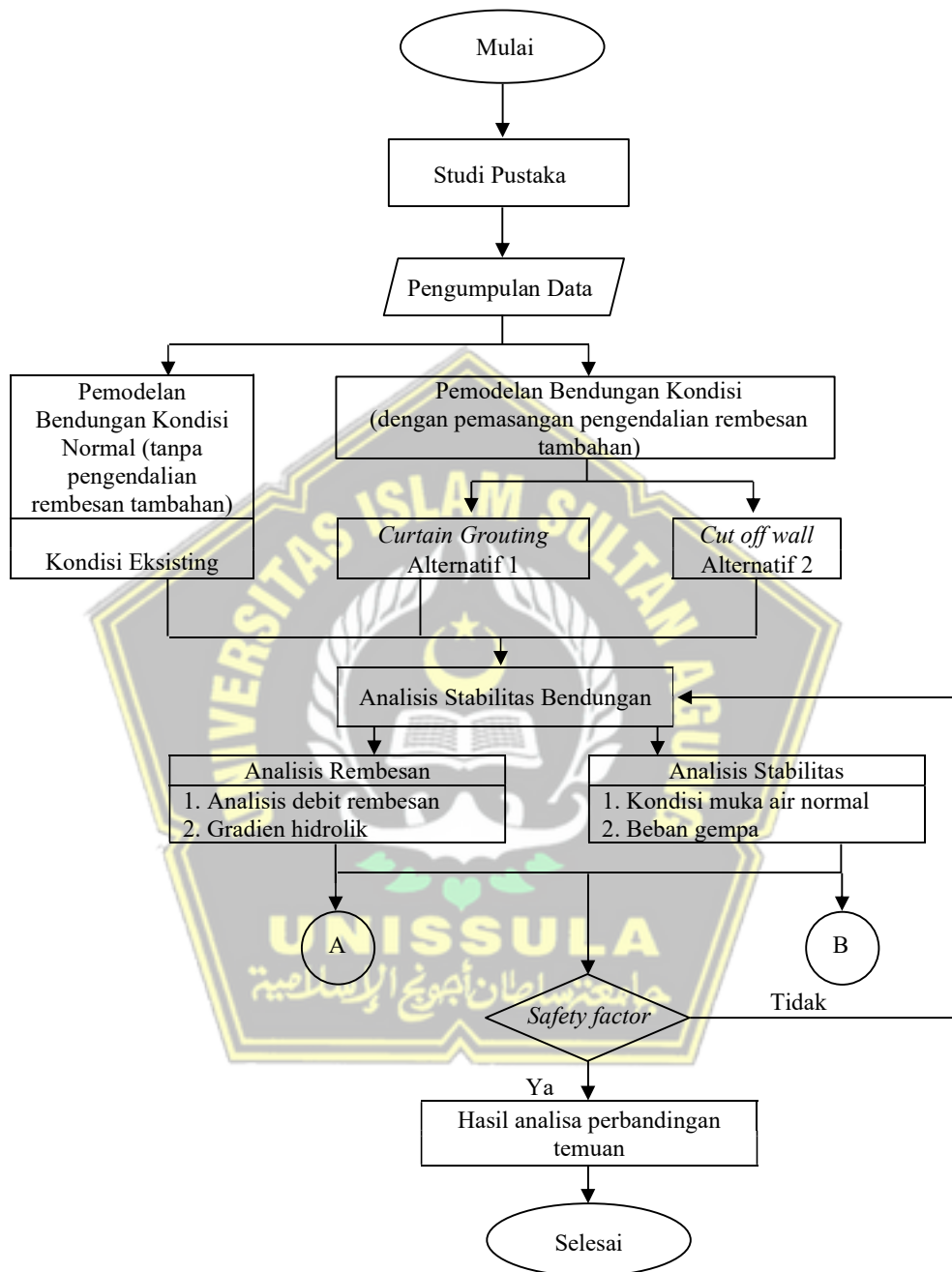
### 3.6.3 Analisa

Dalam penelitian ini, analisis difokuskan pada satu STA dengan mempertimbangkan tiga alternatif tipikal bendungan, yaitu:

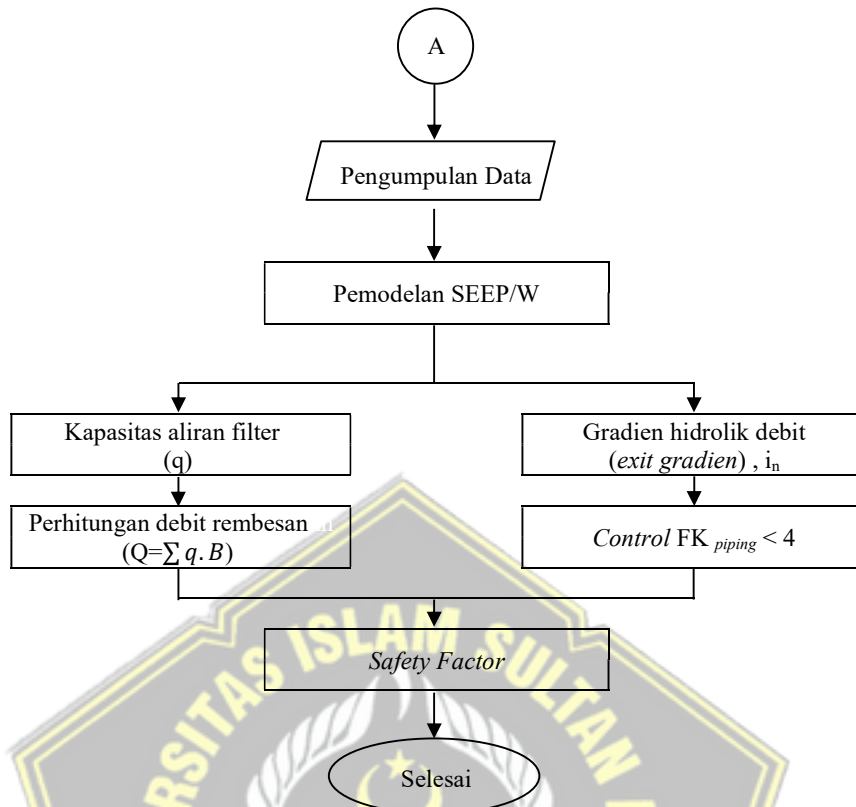
1. Eksisiting : Tipikal bendungan tanpa pengendalian tambahan.
2. Alternatif 1 : Tipikal bendungan dengan pengendalian tambahan menggunakan *Curtain grouting*.
3. Alternatif 2 : Tipikal bendungan dengan pengendalian tambahan menggunakan *Cut off wall*.

Nilai kemiringan hidrolis untuk aliran dan parameter material pondasi diperoleh melalui pemodelan, penelitian lapangan, dan pengujian laboratorium saat menganalisis bendungan dan pondasi pada kondisi muka air yang umum. Selanjutnya, Persamaan (2.15) digunakan untuk menghitung faktor keamanan untuk pipa yang mungkin digunakan.

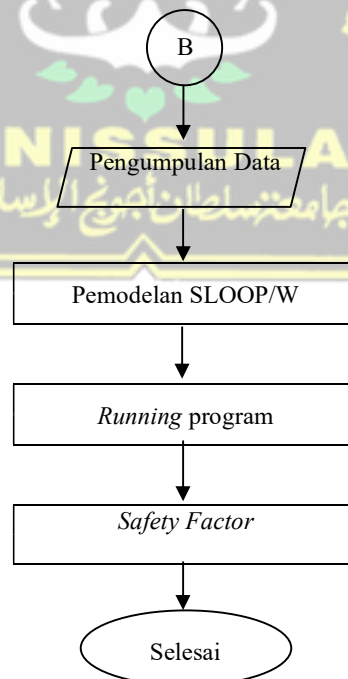
### 3.7 Bagan Alir Penelitian



Gambar 3. 6 Diagram Alir Penelitian



**Gambar 3. 7** Diagram Alir Analisis Rembesan



**Gambar 3. 8** Diagram Alir Analisis Stabilitas

## BAB IV

### HASIL PENELITIAN

#### 4.1 Kriteria Beban Gempa

Analisis risiko Bendungan Jragung ditunjukkan pada Tabel 4.1, dan penentuan tingkat risiko dimaksudkan untuk menentukan kategorisasi kelas risiko.

**Tabel 4. 1** Bobot Faktor Risiko Bendungan

| No            | Data Umum Bendungan              |                      | Bobot Faktor Risiko ( $FK_{tot}$ ) |
|---------------|----------------------------------|----------------------|------------------------------------|
| 1.            | Kapasitas tampungan              | 90 jt m <sup>3</sup> | 4                                  |
| 2.            | Tinggi bendungan terhadap galian | 59,5 m               | 6                                  |
| 3.            | Kebutuhan evakuasi               | >1000                | 12                                 |
| 4.            | Tingkat kerusakan hilir          | Sangat tinggi        | 12                                 |
| <b>Jumlah</b> |                                  |                      | <b>34</b>                          |

(Sumber: Perhitungan Penulis, 2025)

Menentukan kelas risiko dilakukan setelah menentukan bobot faktor risiko. Hal ini ditampilkan pada Tabel 4.2.

**Tabel 4. 2** Kelas Risiko

| Faktor Risiko Total | Kelas Risiko |
|---------------------|--------------|
| (0-6)               | I (Rendah)   |
| (7-18)              | II (Moderat) |
| (19-30)             | III (Tinggi) |
| (31-36)             | IV (Ekstrem) |

(Sumber: Pd t-14-2004-A, 2004)

Berdasarkan Tabel 4.2 menyatakan bahwa Bendungan Jragung masuk dalam kelas risiko IV (ekstrem) sehingga kelas risiko dengan masa guna tertera pada Tabel 4.3

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

| Kelas Risiko<br>Dengan Masa Guna | Persyaratan Tanpa Kerusakan |                 | Persyaratan Diperkenankan Ada Kerusakan Tanpa Keruntuhan |                            |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------|----------------------------|
|                                  | T<br>(thn)                  | Metode Analisis | T<br>(thn)                                               | Metode Analisis            |
| IV<br>N=50-100                   | 100-200<br>$a_d \geq 0,1g$  | Koef. gempa     | 10.000<br>(MDE)                                          | Koef. gempa atau dinamik * |
| III<br>N=50-100                  | 50-100<br>$a_d \geq 0,1g$   | Koef. gempa     | 5000<br>(MDE)                                            | Koef. gempa atau dinamik * |
| II<br>N=50-100                   | 50-100<br>$a_d \geq 0,1g$   | Koef. gempa     | 3000<br>(MDE)                                            | Koef. gempa atau dinamik * |
| I<br>N=50-100                    | 50-100<br>$a_d \geq 0,1g$   | Koef. gempa     | 1000<br>(MDE)                                            | Koef. gempa atau dinamik * |

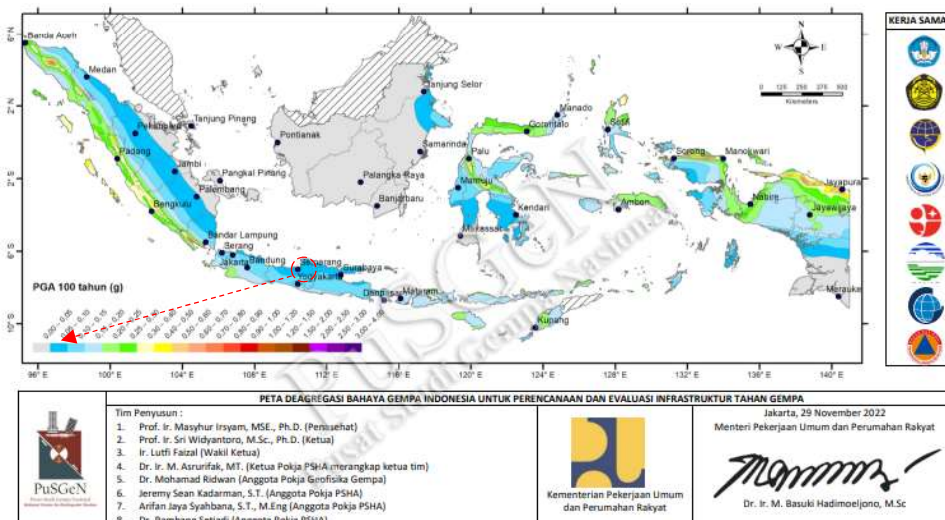
(Sumber: Pd t-14-2004-A, 2004)

Berdasarkan Tabel 4.3, periode ulang gempa bumi 100 tahun dipilih untuk gempa bumi OBE dan 10.000 tahun untuk gempa bumi MDE.

## 4.2 Koefisien Gempa Termodifikasi

### 4.2.1 Gempa OBE (*Operating basis earthquake*)

Nilai PGA pada peta digunakan untuk melakukan analisis beban berdasarkan jenis gempa OBE dan peta gempa yang digunakan dengan waktu ulang 100 tahun pada Gambar 4.1.



**Gambar 4. 1** Peta Percepatan Puncak dibuatuan Dasar (SB) Periode Ulang 100 thn

(Sumber : Peta Deagregasi Bahaya Gempa,(PuSGeN, 2022))

Percepatan puncak di batuan dasar pada periode ulang gempabumi ditetapkan sebesar 0,05 sampai dengan 0,10 g untuk penelitian perhitungan dengan memanfaatkan beban gempa bumi OBE, berdasarkan analisis gempabumi dengan periode ulang  $T = 100$  tahun dari peta zona gempabumi Indonesia (PuSGeN, 2022).

$$K_{100} = 0,10 \quad (\text{Peta Deagregasi Bahaya Gempa, (PuSGeN, 2022)})$$

$$K_h = \frac{ad}{g}$$

$$= \frac{0,10}{0,98}$$

$$= 0,102$$

$$K_o = \alpha_2 \times K_h$$

$$= 0,5 \times 0,102$$

$$= 0,051$$

$$K = \text{Untuk } 0 < Y/H \leq 0,4 \quad (\text{Persamaan 2.24})$$

$$= \text{Untuk } 0,4 < Y/H \leq 1,0 \quad (\text{Persamaan 2.25})$$

$$K_v = (K_h \times 2)/3 \quad \text{Dari jurnal (Hidayawan et al., 2024)}$$

Horizontal

$$K(Y/h)_{0,25} = K_o \times \{2,5 - 1,85 \times (Y/h)\}$$

$$= 0,051 \times \{2,5 - 1,85 \times (0,25)\}$$

$$= 0,104 \text{ g}$$

$$K(Y/h)_{0,50} = K_o \times \{2,0 - 0,60 \times (Y/h)\}$$

$$= 0,051 \times \{2,0 - 0,60 \times (0,50)\}$$

$$= 0,087 \text{ g}$$

$$K(Y/h)_{0,75} = K_o \times \{2,0 - 0,60 \times (Y/h)\}$$

$$= 0,051 \times \{2,0 - 0,60 \times (0,50)\}$$

$$= 0,079 \text{ g}$$

$$K(Y/h)_{1,0} = K_o \times \{2,0 - 0,60 \times (Y/h)\}$$

$$= 0,051 \times \{2,0 - 0,60 \times (1,0)\}$$

$$= 0,071 \text{ g}$$

Vertikal

$$\begin{aligned}
 K_v(Y/h)0,25 &= (K_h x 2)/3 & K_v(Y/h)0,75 &= (K_h x 2)/3 \\
 &= (0,104 x 2)/3 & &= (0,079 x 2)/3 \\
 &= 0,104 \text{ g} & &= 0,053 \text{ g} \\
 K_v(Y/h)0,50 &= (K_h x 2)/3 & K_v(Y/h)1,0 &= (K_h x 2)/3 \\
 &= (0,087 x 2)/3 & &= (0,051 x 2)/3 \\
 &= 0,058 \text{ g} & &= 0,048 \text{ g}
 \end{aligned}$$

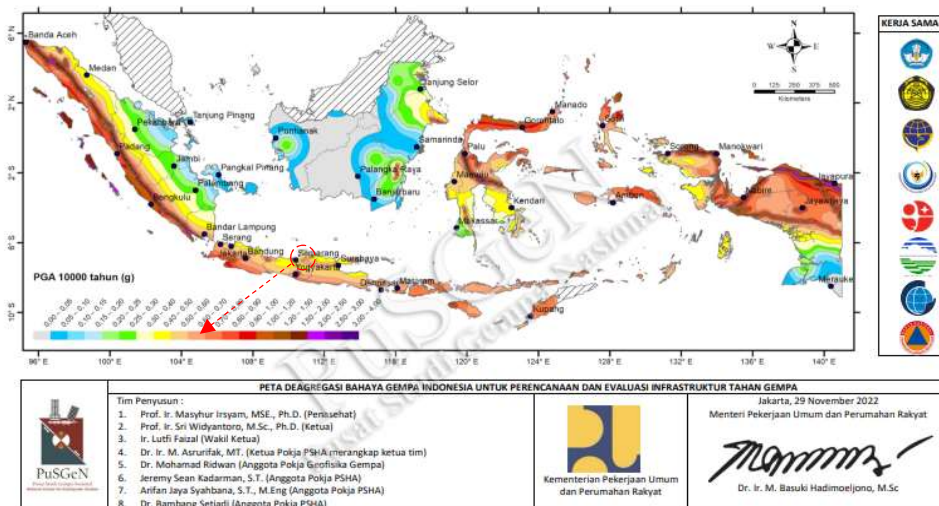
**Tabel 4. 4** Resume Hasil Nilai Koefisien Beban Gempa OBE

| Y/H   | 0,25<br>(g) | 0,50<br>(g) | 0,75<br>(g) | 1,00<br>(g) |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $K_h$ | 0,104       | 0,087       | 0,079       | 0,071       |
| $K_v$ | 0,069       | 0,058       | 0,053       | 0,048       |

(Sumber: Perhitungan Penulis, 2025)

#### 4.2.2 Gempa MDE (*Maximum design earthquake*)

Nilai PGA pada peta digunakan untuk melakukan analisis beban berdasarkan jenis gempa MDE dan peta gempa yang digunakan dengan waktu ulang 10.000 tahun pada Gambar 4.2.



**Gambar 4. 2** Peta Percepatan Puncak dibatuan Dasar (SB) Periode Ulang 10.000 thn  
(Sumber : Peta Deagregasi Bahaya Gempa,(PuSGeN, 2022))

Percepatan puncak di batuan dasar pada periode ulang gempabumi ditetapkan sebesar 0,60 sampai dengan 0,70 g untuk penelitian perhitungan dengan memanfaatkan beban gempabumi MDE, berdasarkan analisis gempabumi dengan periode ulang  $T = 10.000$  tahun dari peta zona gempabumi Indonesia (PuSGeN, 2022).

$$K_{100} = 0,70 \quad (\text{Peta Deagregasi Bahaya Gempa, (PuSGeN, 2022)})$$

$$\begin{aligned} K_h &= \frac{ad}{g} \\ &= \frac{0,70}{0,98} \\ &= 0,714 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_o &= \alpha_2 \times K_h \\ &= 0,5 \times 0,714 \\ &= 0,357 \end{aligned}$$

$$K = \text{Untuk } 0 < Y/H \leq 0,4 \quad (\text{Persamaan 2.24})$$

$$= \text{Untuk } 0,4 < Y/H \leq 1,0 \quad (\text{Persamaan 2.25})$$

$$K_v = (K_h \times 2)/3 \quad \text{Dari jurnal (Hidayawan et al., 2024)}$$

Horizontal

$$\begin{aligned} K(Y/h)0,25 &= K_o \times \{2,5 - 1,85 \times (Y/h)\} \\ &= 0,357 \times \{2,5 - 1,85 \times (0,25)\} \\ &= 0,728 \, g \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K(Y/h)0,50 &= K_o \times \{2,0 - 0,60 \times (Y/h)\} \\ &= 0,357 \times \{2,0 - 0,60 \times (0,50)\} \\ &= 0,607 \, g \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K(Y/h)0,75 &= K_o \times \{2,0 - 0,60 \times (Y/h)\} \\ &= 0,357 \times \{2,0 - 0,60 \times (0,50)\} \\ &= 0,554 \, g \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K(Y/h)1,0 &= K_o \times \{2,0 - 0,60 \times (Y/h)\} \\ &= 0,357 \times \{2,0 - 0,60 \times (1,0)\} \\ &= 0,500 \, g \end{aligned}$$

Vertikal

$$\begin{aligned}
 K_v(Y/h)0,25 &= (K_h \times 2)/3 & K_v(Y/h)0,75 &= (K_h \times 2)/3 \\
 &= (0,728 \times 2)/3 & &= (0,554 \times 2)/3 \\
 &= 0,485 \text{ g} & &= 0,369 \text{ g} \\
 K_v(Y/h)0,50 &= (K_h \times 2)/3 & K_v(Y/h)1,0 &= (K_h \times 2)/3 \\
 &= (0,607 \times 2)/3 & &= (0,500 \times 2)/3 \\
 &= 0,405 \text{ g} & &= 0,333 \text{ g}
 \end{aligned}$$

**Tabel 4. 5** Resume Hasil Nilai Koefisien Beban Gempa MDE

| Y/H   | 0,25<br>(g) | 0,50<br>(g) | 0,75<br>(g) | 1,00<br>(g) |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $K_h$ | 0,728       | 0,607       | 0,554       | 0,500       |
| $K_v$ | 0,485       | 0,405       | 0,369       | 0,333       |

(Sumber: Perhitungan Penulis, 2025)

### 4.3 Analisis Pemodelan

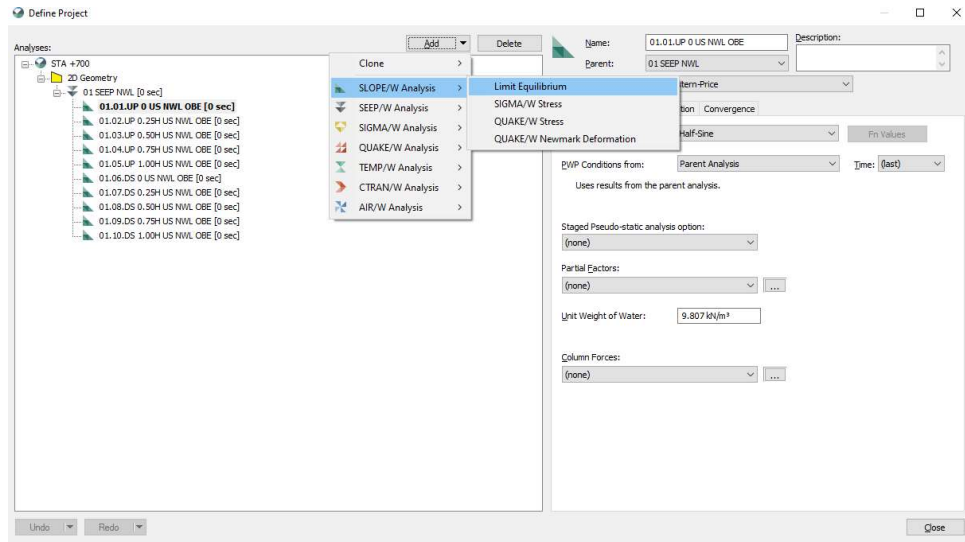
Dalam tahap analisis dilakukan dengan bantuan *software (Limit Equilibrium Method)*, yang mana didalam *software* tersebut menganalisis dengan program SEEP/W, dan SLOPE/W.

#### 4.3.1 Analisis *Safety Of Factor*

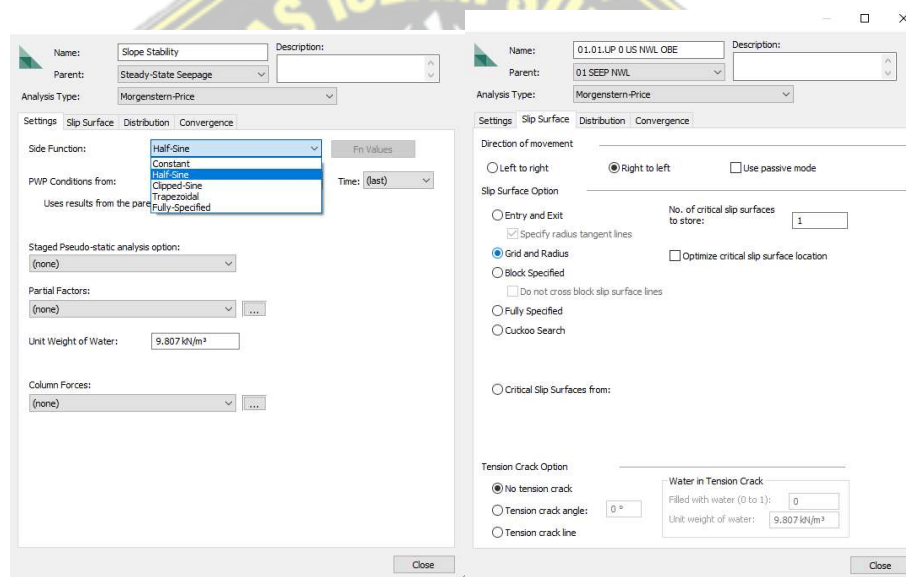
Dalam tahap analisis dilakukan untuk mengetahui nilai *safety of factor* yang dianalisis dengan program SLOPE/W. Pada analisis lereng ini digunakan analisis type *Morgenstern-price*, berikut langkah-langkah analisisnya:

##### 1. *Define Project*

Pada tahap ini menggunakan program *SLOPE/W Analysis > Limit Equilibrium > Analysis type Morgenstern-price > Settings > Side Function > Slip Surface > Direction of movement > Slip surface Option* , pada Gambar 4.3:



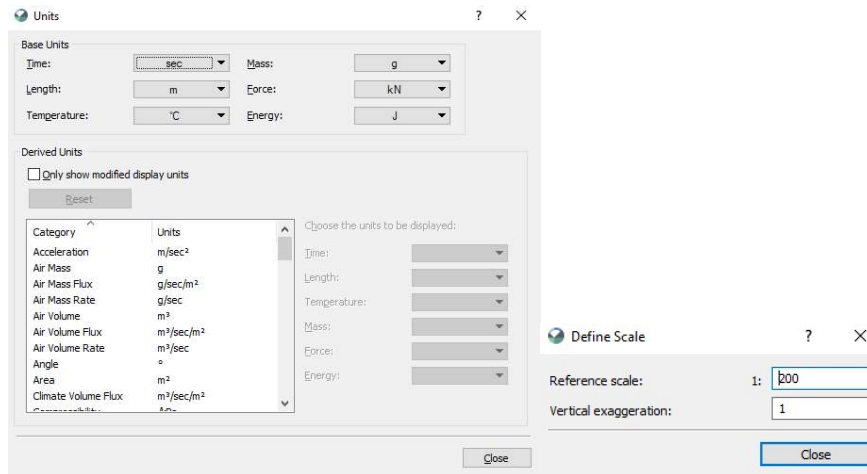
**Gambar 4. 3** Menu *Define Project*



**Gambar 4. 4** *Define Project Settings*

## 2. Skala dan Units

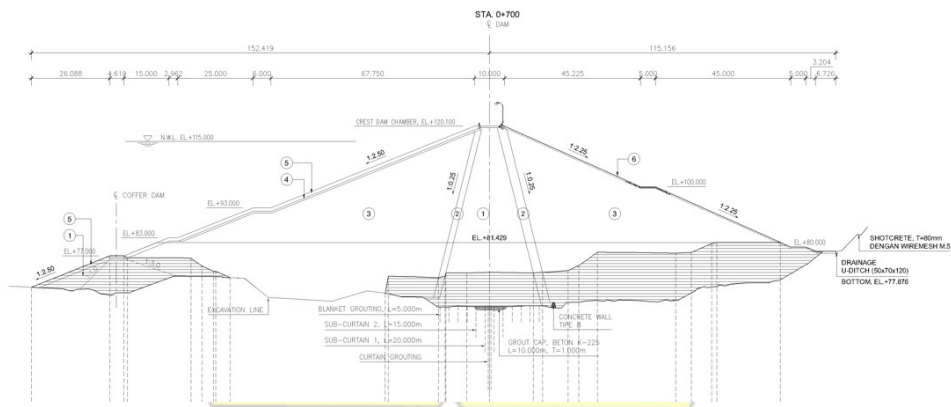
Tahap ini untuk menentukan batasan pemodelan dan pengaturan satuan pada pemodelan yang digunakan. Pengaturan skala dan grid dapat dilakukan, ditunjukkan Gambar 4.5 :



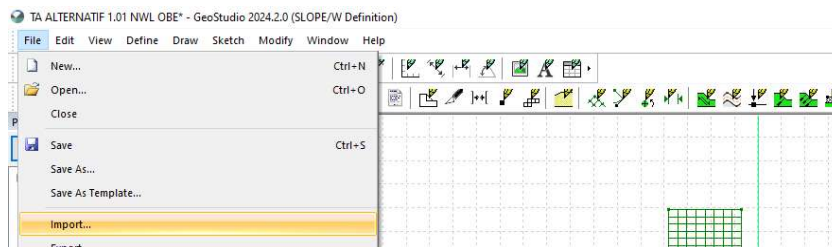
**Gambar 4. 5** Pengaturan Skala dan Units

### 3. Geometri

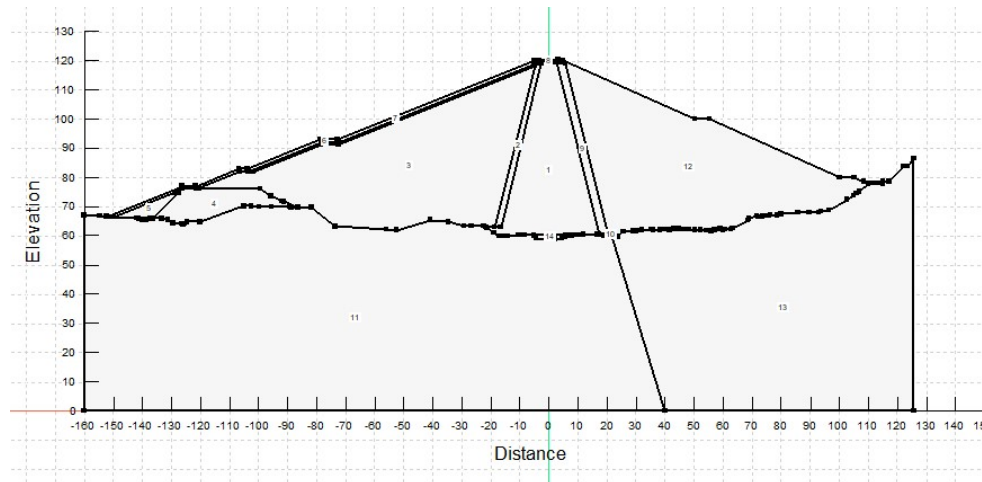
Selanjutnya, gambar skema *polyline*, atau *impor* gambar ke dalam program dari berkas .dwg. Perlu diketahui juga bahwa gambar harus berada dalam status *polyline*, seperti yang terlihat pada Gambar 4.6 hingga 4.8, agar lebih mudah:



**Gambar 4. 6** CAD .dwg



**Gambar 4. 7** Import Geometri

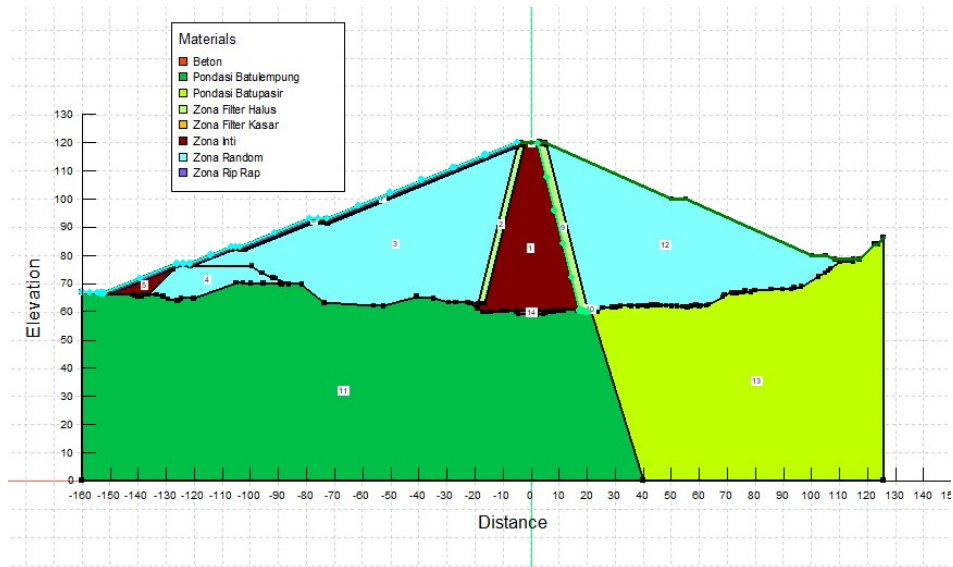


**Gambar 4. 8** Sketsa Polyline pada *Software*

#### 4. *Define Materials*

Pada tampilan Gambar 4.9 menampilkan parameter yang diperlukan *Unit Weight*, *C*, dan *Phi* dalam material yang digunakan untuk analisis stabilitas program menggunakan SLOPE/W.:

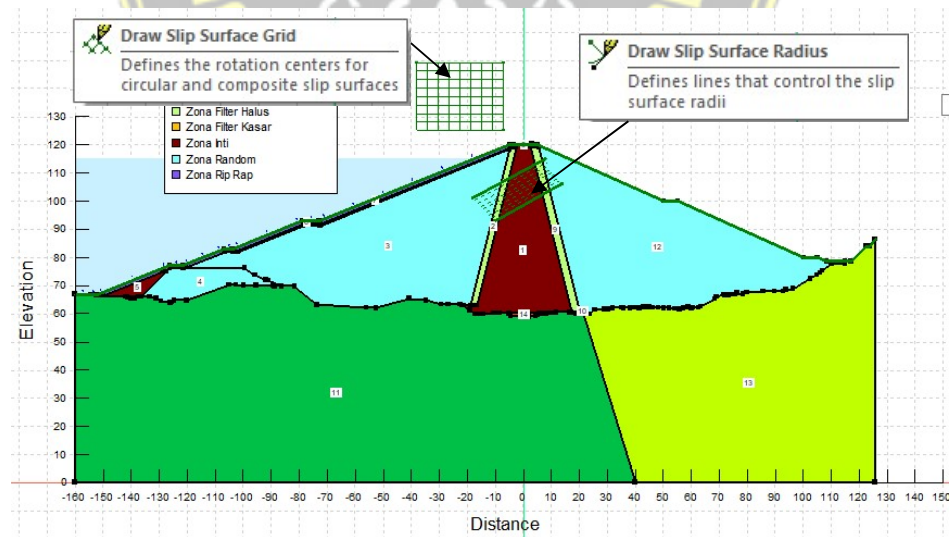
**Gambar 4. 9** *Define Materials*



**Gambar 4. 10** Setelah *Input Material*

##### 5. *Draw Slip Surface*

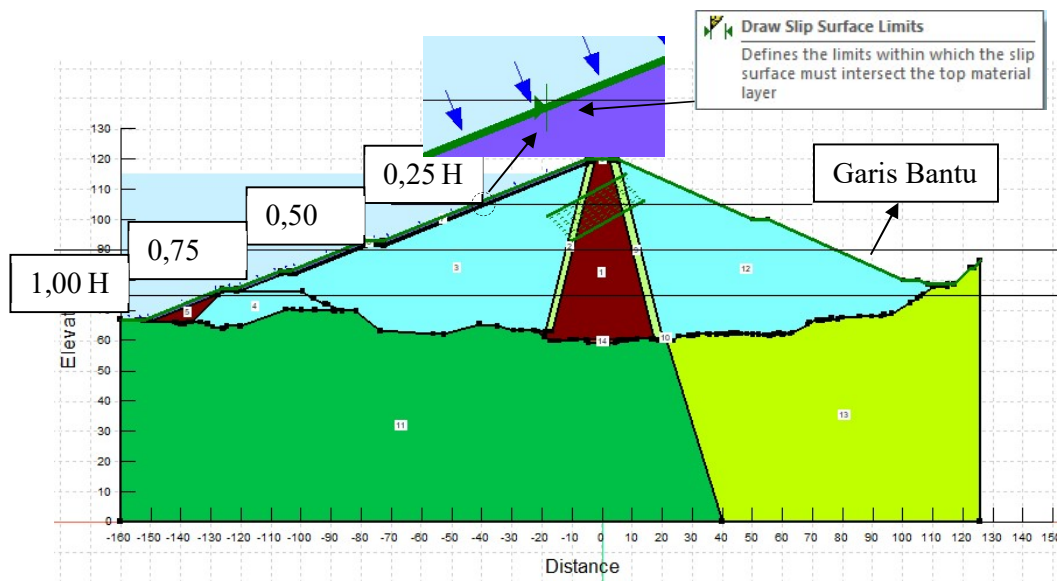
Pada langkah ini yang terlihat pada Gambar 4.11 anda menggunakan *grid and radius* untuk analisis lereng dengan metode yang berdasarkan prinsip kesetimbangan batas:



**Gambar 4. 11** *Draw Slip Surface Grid and Radius*

Tahap ini melibatkan penggunaan garis untuk membatasi batas koefisien gempa bumi pada kedalaman Y dari berbagai puncak, seperti yang ditunjukkan pada

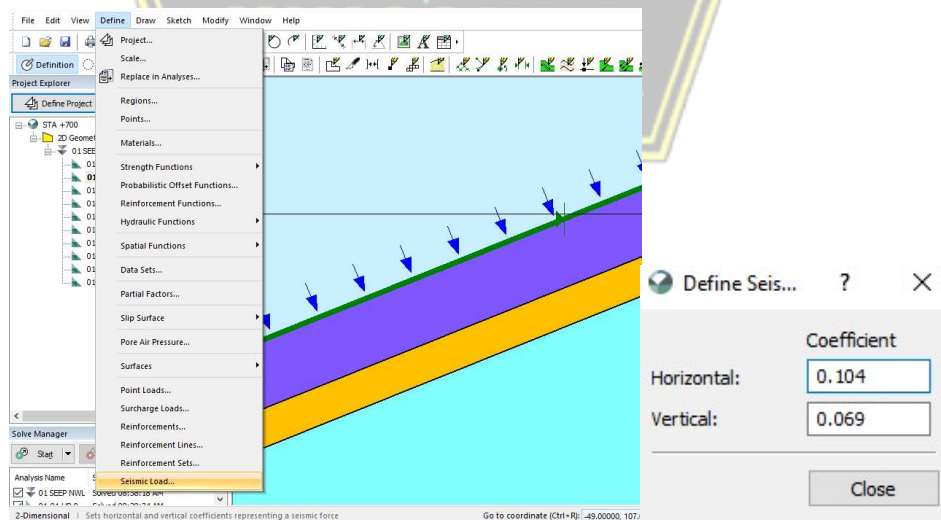
Gambar 4.12 pada  $Y/H = 0,25H, 0,50H, 0,75H$ , dan  $1,00H$ , di mana  $H$  adalah tinggi bendungan.



**Gambar 4. 12 Draw Slip Surface Limits**

#### 6. *Seismic Load*

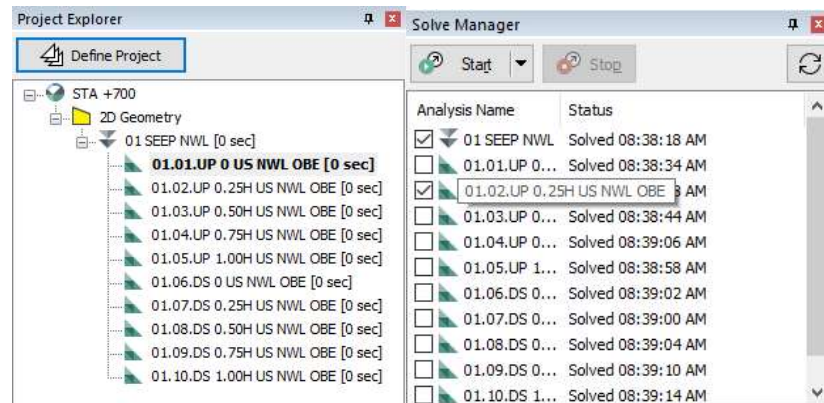
Berdasarkan hasil koefisien gempa horizontal dan vertikal yang diperiksa dalam  $Y/H = 0,25H; 0,50H; 0,75H; 1,00H$  dan ( $H$  adalah tinggi bendungan), masukan beban seismik diisi pada Gambar 4.13:



**Gambar 4. 13 Seismic Load**

## 7. Run Program

Untuk *run program* pada program ini disajikan dengan nama *solve manager* dengan prinsip yang sama, pada program ini anda bisa memilih atau mengecualikan *define project* mana saja yang ingin dirun. Jika sudah bisa *check list define project*, pada Gambar 4.14 :



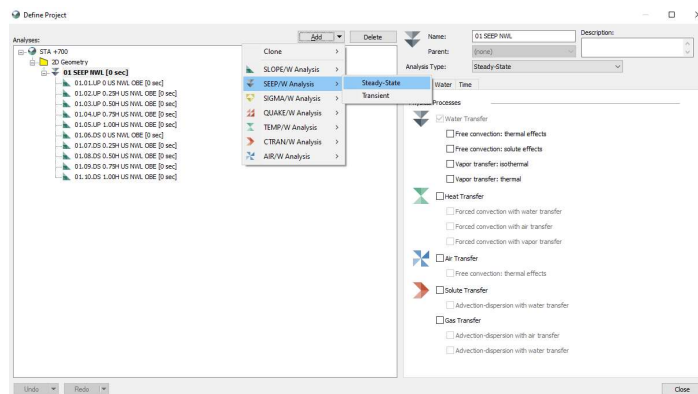
Gambar 4. 14 Solve Manager SLOPE/W

## 4.3.2 Analisis Simulasi Rembesan

Dalam tahap analisis dilakukan untuk mengetahui nilai *safety of factor* yang dianalisis dengan program SLEEP/W. Pada analisis ini digunakan analisis type *Morgenstern-price*, berikut langkah-langkah analisisnya:

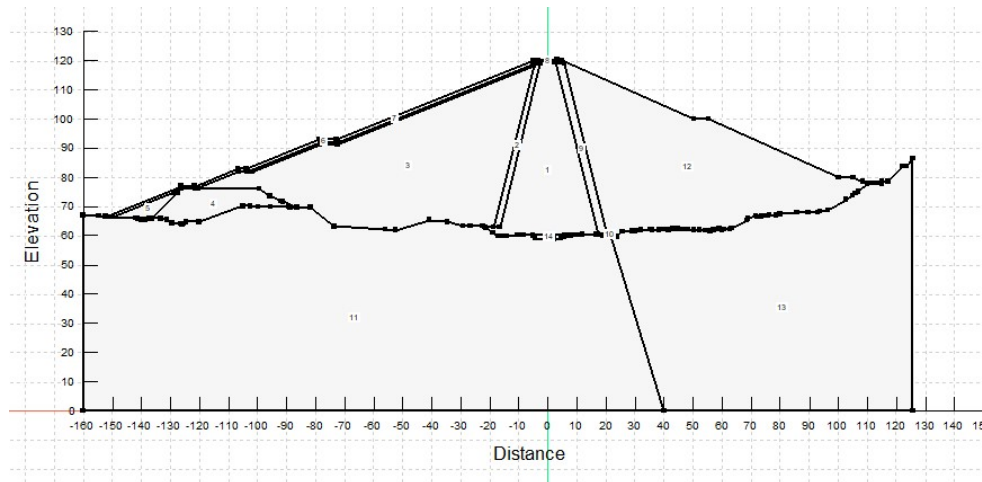
### 1. Define Project

Pada tahap ini menggunakan program SEEP/W tipe analisis *steady state* seperti Gambar 4.15 :



Gambar 4. 15 Define Project SEEP/W

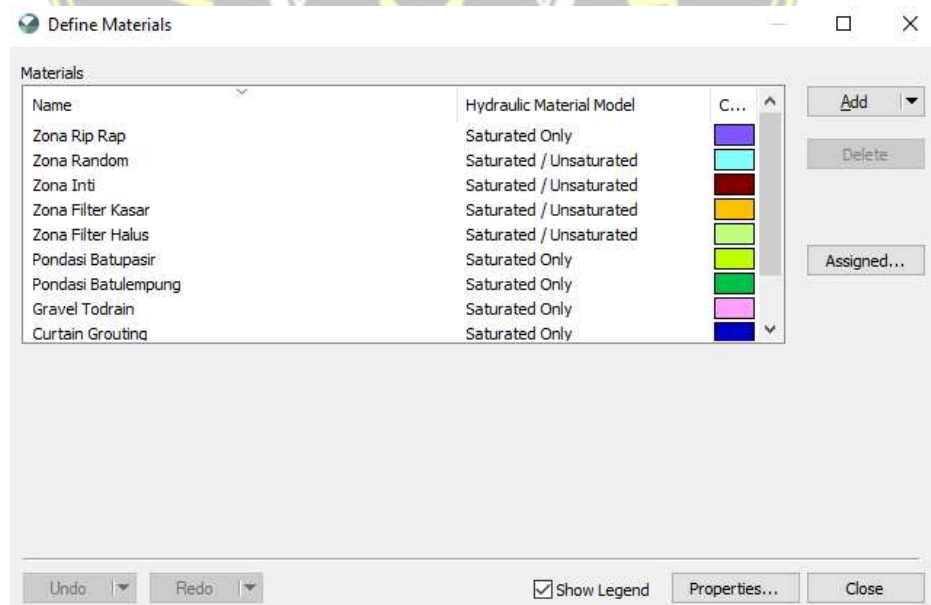




**Gambar 4. 18** Gambar Polyline pada *Software*

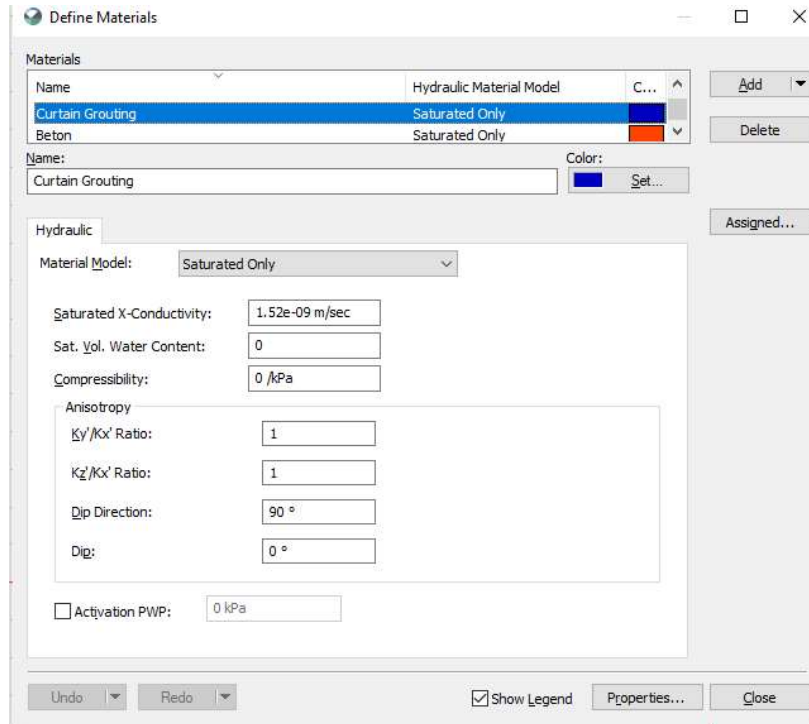
#### 4. *Draw Materials*

Pada material untuk analisis terhadap stabilitas program yang digunakan SEEP/W, parameter yang diperlukan hasil nilai  $k$  dari uji permeabilitas tanah dan *water content* tanah, ditunjukkan Gambar 4.19 :

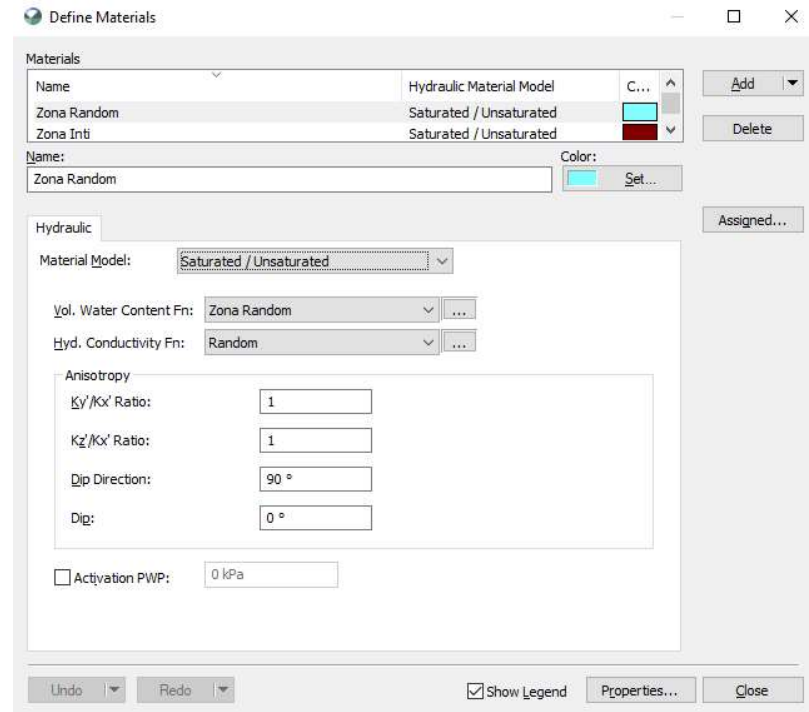


**Gambar 4. 19** *Define Materials*

Material perlu *input Hydraulic Material Model* diantaranya *Saturated Only* dan *Satureted/Unsatureted*, ditunjukkan Gambar 4.20 sampai dengan Gambar 4.21:

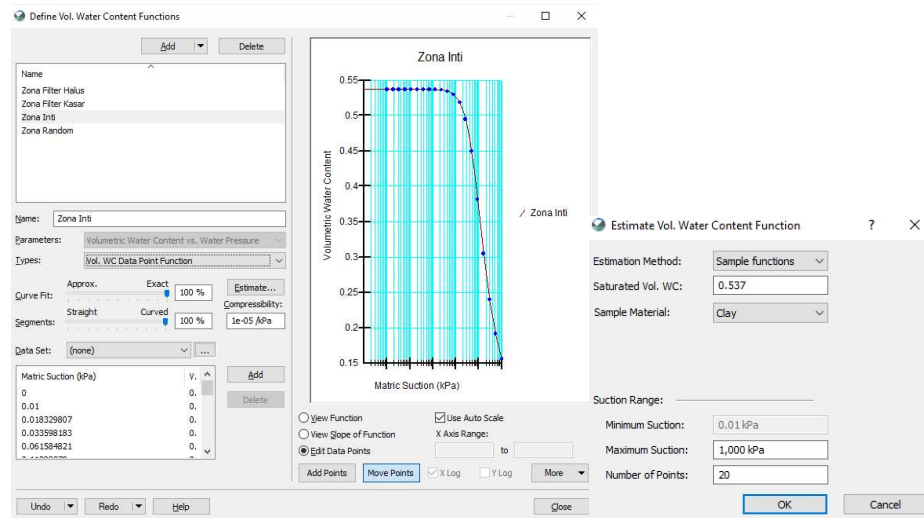


**Gambar 4. 20 Satureted Only**



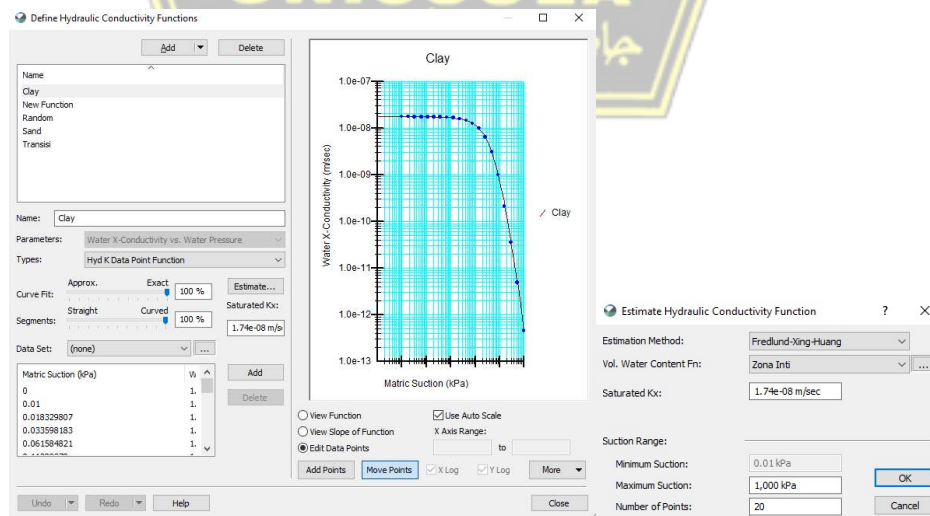
**Gambar 4. 21 Satureted / Unsatureted**

*Material Model Saturated/Unsaturated*, perlu *Input Vol. Water Content Functions* dan *Hyd. Conductivity Functions*. Dan langkah *Vol. Water Content Functions* diantaranya *Input Define Vol. Water Content Functions > Add Material > Vol. WC Data Point Function > Estimate Vol. Water Content Functions*, Pada Gambar 4.22 :

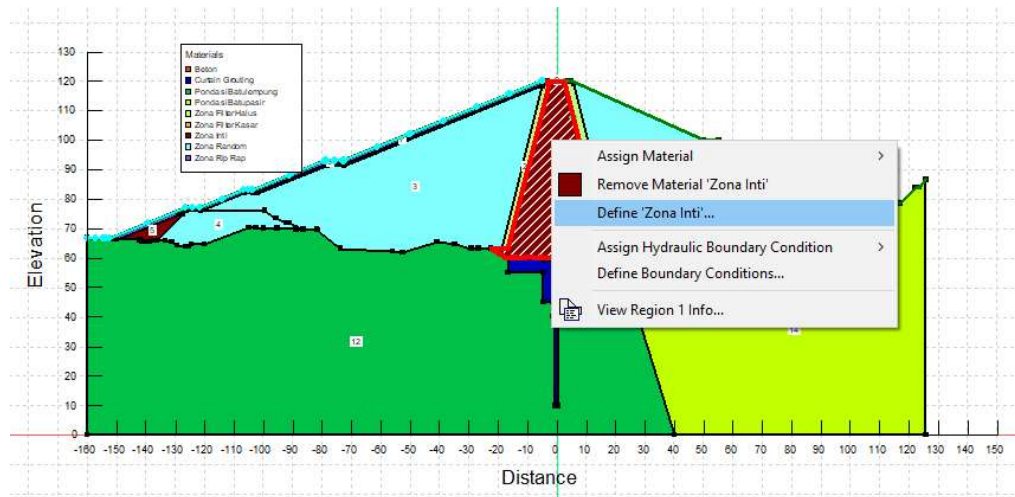


**Gambar 4. 22 Define Vol. Water Content Functions**

Dan pada *Hyd. Conductivity Functions*, Perlu langkah berikut diantaranya *Input Define Hyd. Conductivity Functions > Add Material > Hyd K Data Point Functions > Estimate Hydraulic Conductivity > Estimate Method > Vol. Water Content Functions*, ditunjukkan Gambar 4.23 :



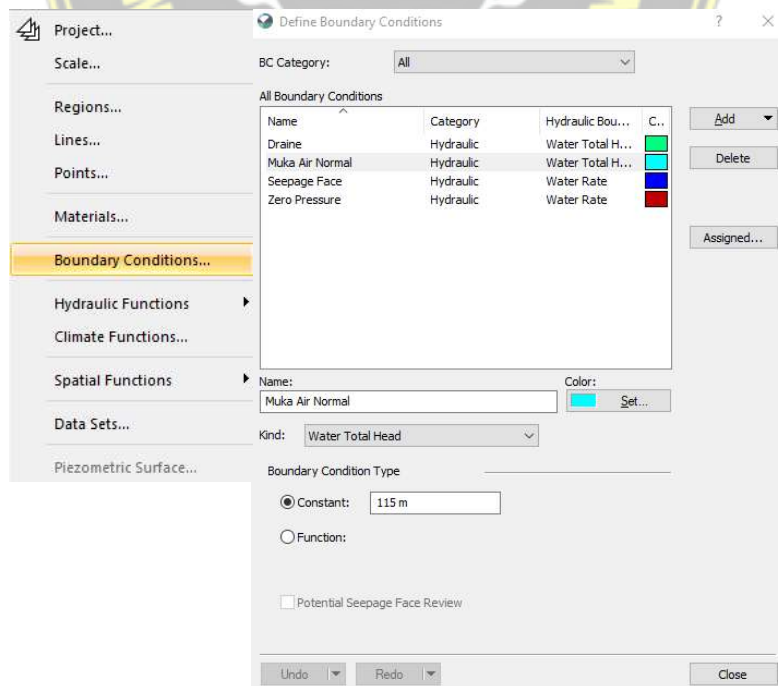
**Gambar 4. 23 Define Hyd. Conductivity Functions**



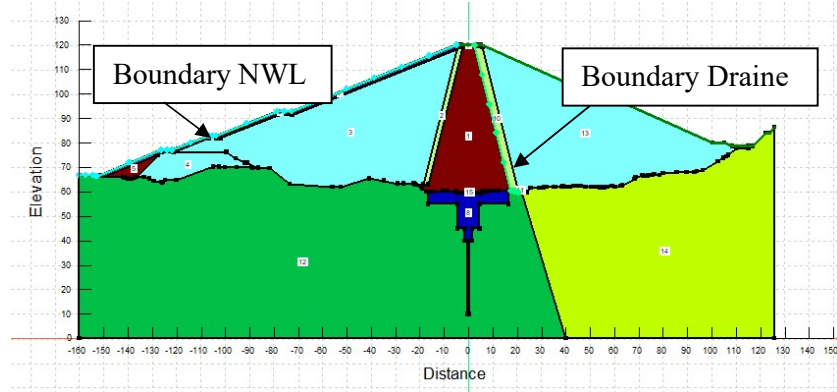
**Gambar 4. 24** Setelah Input Material

##### 5. *Boundary Conditions*

Pada *Boundary Conditions* yang merupakan langkah penting sebagai batasan analisis yang menggambarkan kondisi air. Dengan langkah *Define Boundary Conditions > Add Material > Kind > Boundary Condition Type > Input Constant* dari nilai NWL. Karena penelitian ini hanya kondisi NWL (*Normal Water Level*), pada Gambar 4.25 :



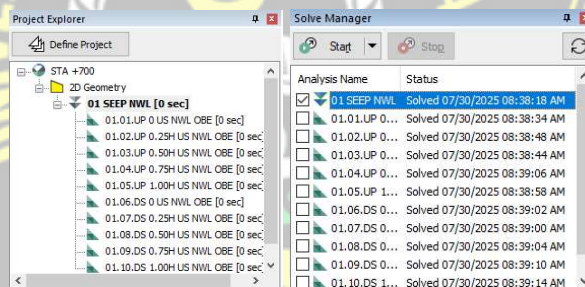
**Gambar 4. 25** Define Boundary Conductivity



**Gambar 4. 26** Setelah *Input Boundary*

#### 6. *Run Program*

Untuk *run program* pada program ini disajikan dengan nama *solve manager* dengan prinsip yang sama, pada program ini anda bisa memilih atau mengecualikan *define project* mana saja yang ingin *dirun*. Jika sudah bisa *check list define project*, seperti Gambar 4.27 :



**Gambar 4. 27** *Solve Manager SEEP/W*

#### 4.3.3 *Stagging Analysis*

Berikut merupakan rangkuman *Stagging Analysis* kondisi MAN (Muka air normal) yang digunakan, ditunjukkan Tabel 4.6:

**Tabel 4. 6** *Stagging Analysis*

| No | Analysis | Type Analysis            | Parent      | Output                       |
|----|----------|--------------------------|-------------|------------------------------|
| 1  | SEEP/W   | <i>Steady state</i>      | <i>None</i> | Debit dan Kecepatan Rembesan |
| 2  | SLOPE/W  | <i>Morgenstern-price</i> | SEEP/W      | <i>Safety of Factor</i>      |

(Sumber: Analisis Penulis, 2025)

#### 4.4 Hasil Analisis Stabilitas

*Safety of Factor* stabilitas dengan tinjauan pondasi pada kondisi statis dan untuk kontruksi permanen sudah disyaratkan dalam SNI 8064:2016 “ Metode Analisis dan Cara Pengendalian Rembesan Air untuk Bendungan Tipe Urugan ”. Hasil analisis stabilitas statis yang pada *upstream* dan *downstream* Bendungan Jragung pada *cross section* STA +700 dengan kondisi MAN (Muka air normal), ditunjukkan Tabel 4.7 berikut:

**Tabel 4. 7** Syarat Faktor Keamanan Minimum

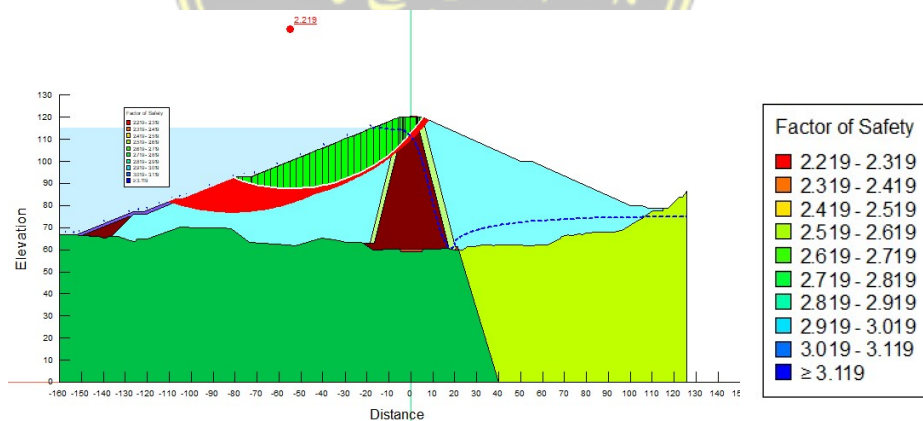
| NO | Kondisi                                                                                                                                                                                              | Kuat Geser | Tekanan Air pori       | FK Tanpa Gempa | FK dengan Gempa * |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------------------|----------------|-------------------|
| 2  | Aliran Langgeng tergantung :<br>1. Evaluasi muka air normal sebelah udik.<br>2. Elevasi muka air sebelah hilir.<br>Lereng/U/S dan D/S dengan gempa tanpa kerusakan digunakan 100% koef gempa desain. | 1. Efektif | Dari analisis rembesan | 1.5            | 1.2               |

(Sumber : SNI, 2016)

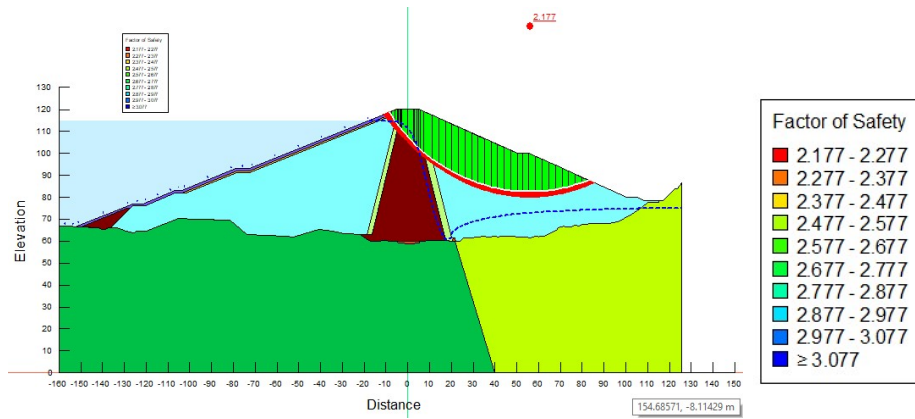
##### 4.4.1 Kondisi MAN Tanpa Beban Gempa

Kondisi MAN (Muka Air Normal) tanpa beban gempa termodifikasi dianalisis pada eksisting, alternatif 1, dan alternatif 2, ditunjukkan berikut :

##### 1. Eksisting

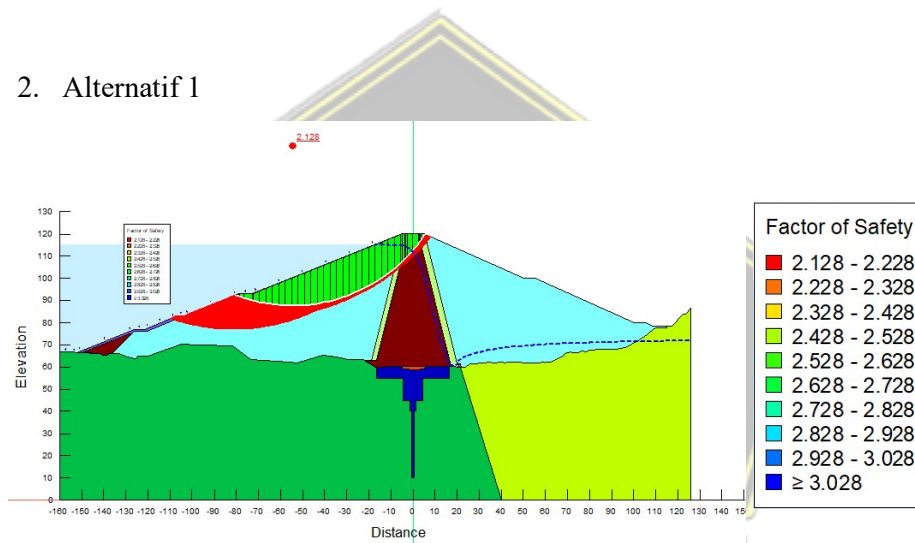


**Gambar 4. 28** *Upstream* Eksisting Tanpa Gempa

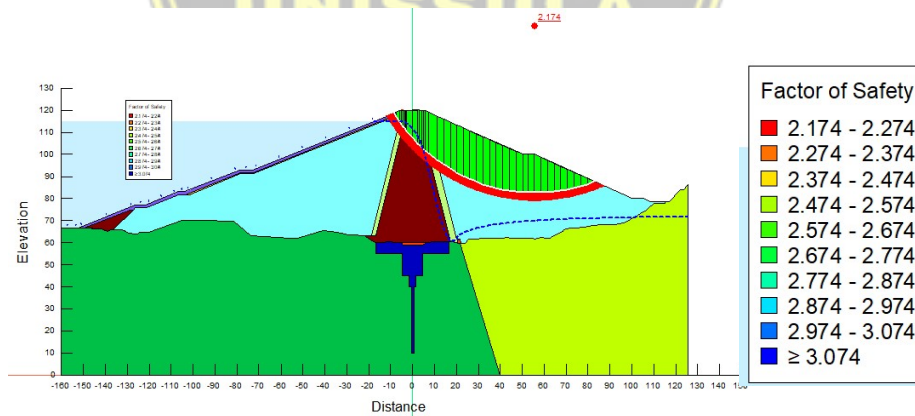


**Gambar 4. 29** Downstream Eksisting Tanpa Gempa

## 2. Alternatif 1

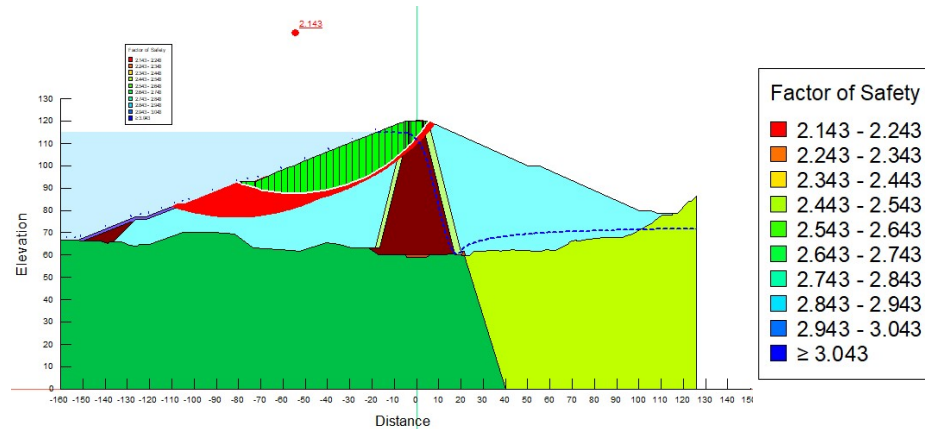


**Gambar 4. 30** Upstream Alternatif 1 Tanpa Gempa

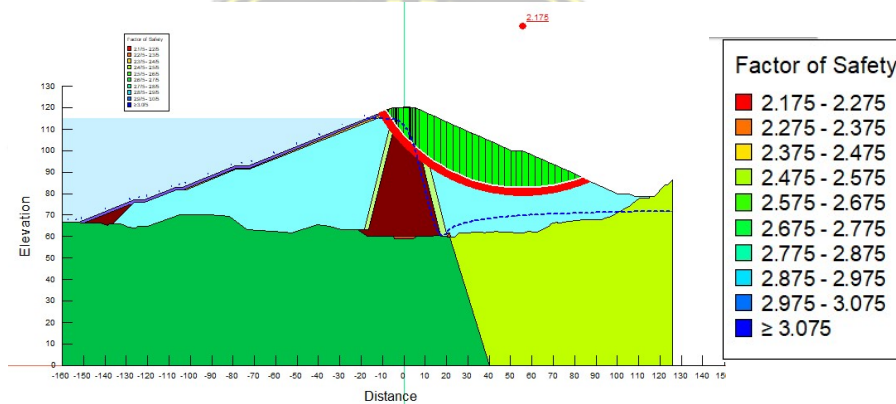


**Gambar 4. 31** Downstream Alternatif 1 Tanpa Gempa

### 3. Alternatif 2



**Gambar 4. 32 Upstream Alternatif 2 Tanpa Gempa**



**Gambar 4. 33 Downstream Alternatif 2 Tanpa Gempa**

**Tabel 4. 8 Rangkuman Nilai *Factor of Safety* Tanpa Gempa**

| No | Deskripsi    | Nilai FS MAN (Muka Air Normal) |            |           | Keterangan |            |
|----|--------------|--------------------------------|------------|-----------|------------|------------|
|    |              | Upstream                       | Downstream | Syarat FS | Upstream   | Downstream |
| 1  | Eksisting    | 2,219                          | 2,177      | 1,5       | Aman (OK)  | Aman (OK)  |
| 2  | Alternatif 1 | 2,128                          | 2,174      | 1,5       | Aman (OK)  | Aman (OK)  |
| 3  | Alternatif 2 | 2,143                          | 2,175      | 1,5       | Aman (OK)  | Aman (OK)  |

(Sumber: Perhitungan Penulis, 2025)

#### 4.4.2 Kondisi MAN Dengan Beban Gempa OBE

Pada kondisi MAN (Muka Air Normal) dengan beban gempa termodifikasi yakni gempa OBE, Adapun nilai koefisien pada Tabel 4.7 berikut :

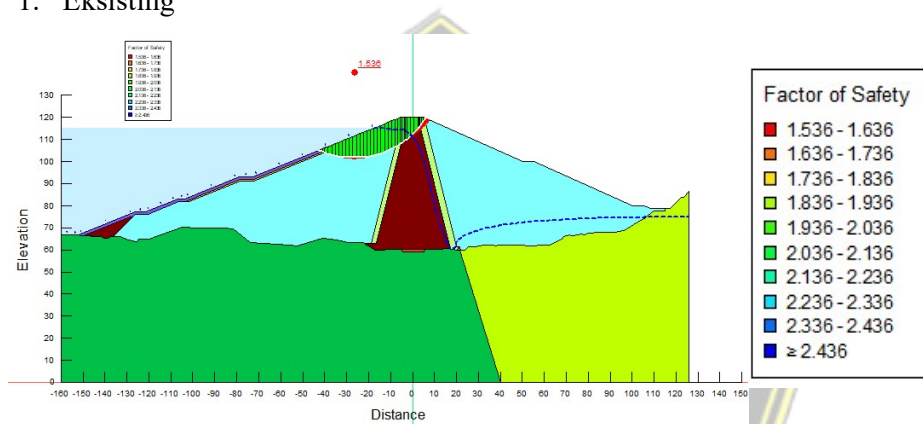
**Tabel 4. 9** Nilai Koefisien Termodifikasi Beban Gempa OBE

| Y/H   | 0,25<br>(g) | 0,50<br>(g) | 0,75<br>(g) | 1,00<br>(g) |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $K_h$ | 0,104       | 0,087       | 0,079       | 0,071       |
| $K_v$ | 0,069       | 0,058       | 0,053       | 0,048       |

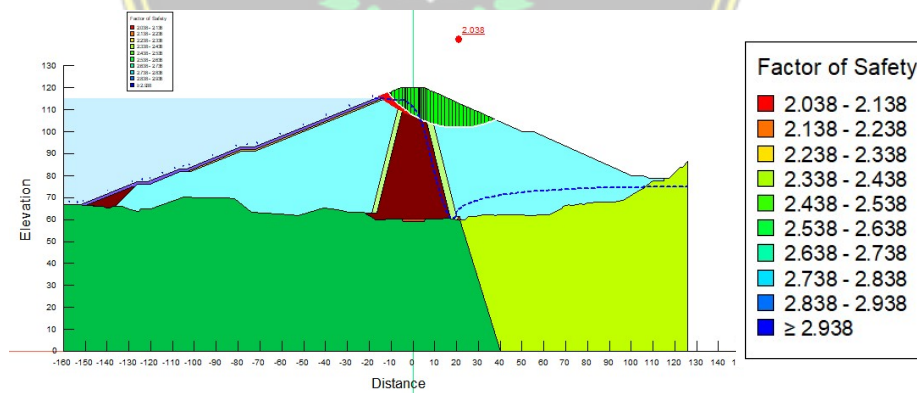
(Sumber: Perhitungan Penulis, 2025)

Kondisi MAN (Muka Air Normal) dengan gempa dianalisis pada eksisting, alternatif 1, dan alternatif 2, sebagai berikut :

### 1. Eksisting



**Gambar 4. 34** *Upstream* Eksisting Gempa OBE 0,25 Y/H



**Gambar 4. 35** *Downstream* Eksisting Gempa OBE 0,25 Y/H

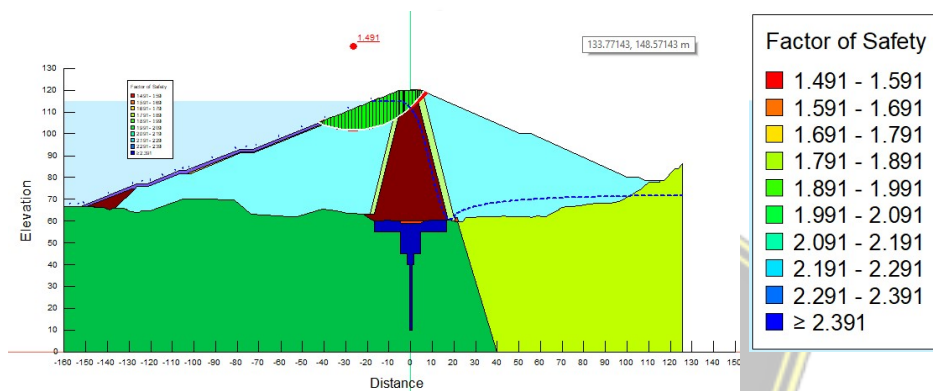
Berdasarkan hasil analisis stabilitas kondisi eksisting dengan gempa OBE pada bendungan menggunakan program didapatkan nilai *Safety of Factor* pada Tabel 4.9:

**Tabel 4. 10** Rangkuman Nilai *Factor of Safety* Eksisting Gempa OBE

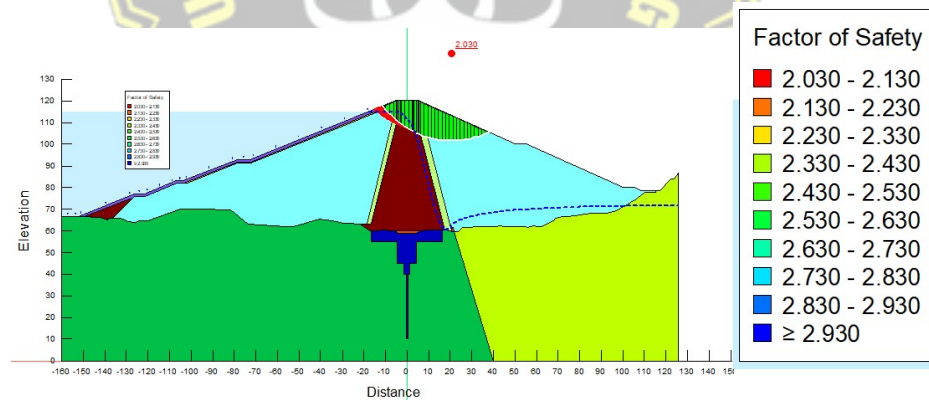
| No | Kondisi | Nilai FS MAN (Muka Air Normal) |            |           | Keterangan |            |
|----|---------|--------------------------------|------------|-----------|------------|------------|
|    |         | Upstream                       | Downstream | Syarat FS | Upstream   | Downstream |
| 1  | 0,25 H  | 1,536                          | 2,038      | 1,2       | Aman (OK)  | Aman (OK)  |
| 2  | 0,50 H  | 1,493                          | 1,667      | 1,2       | Aman (OK)  | Aman (OK)  |
| 3  | 0,75 H  | 1,856                          | 1,732      | 1,2       | Aman (OK)  | Aman (OK)  |
| 4  | 1,00 H  | 2,348                          | 2,165      | 1,2       | Aman (OK)  | Aman (OK)  |

(Sumber: Perhitungan Penulis, 2025)

## 2. Alternatif 1



**Gambar 4. 36** *Upstream* Alternatif 1 Gempa OBE 0,25 Y/H



**Gambar 4. 37** *Downstream* Alternatif 1 Gempa OBE 0,25 Y/H

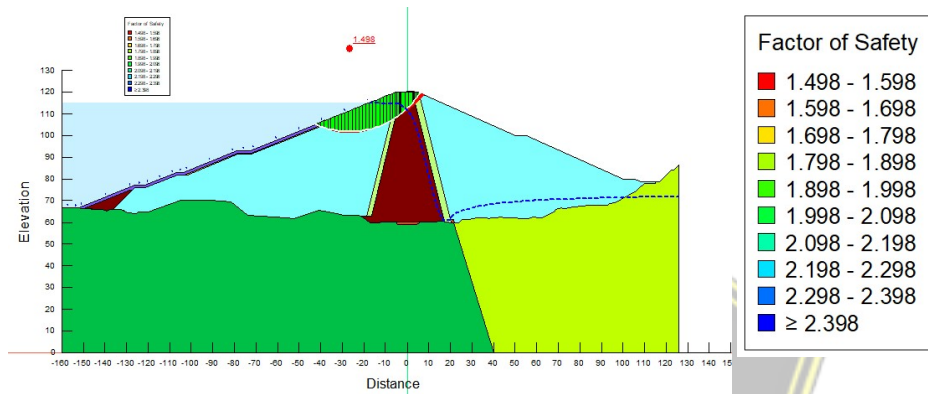
Berdasarkan hasil analisis stabilitas kondisi alternatif 1 dengan gempa OBE pada bendungan menggunakan program didapatkan nilai *Safety of Factor* pada Tabel 4.10:

**Tabel 4. 11** Rangkuman Nilai *Factor of Safety* Alternatif 1 Gempa OBE

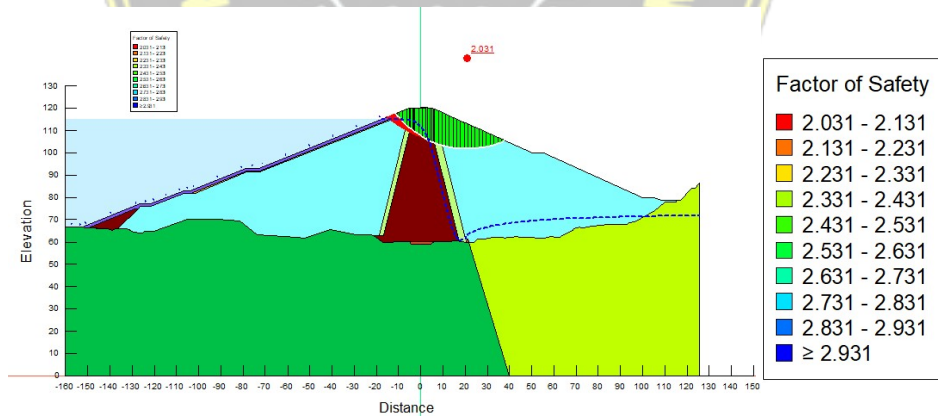
| No | Kondisi | Nilai FS MAN (Muka Air Normal) |            |           | Keterangan |            |
|----|---------|--------------------------------|------------|-----------|------------|------------|
|    |         | Upstream                       | Downstream | Syarat FS | Upstream   | Downstream |
| 1  | 0,25 H  | 1,491                          | 2,030      | 1,2       | Aman (OK)  | Aman (OK)  |
| 2  | 0,50 H  | 1,432                          | 1,664      | 1,2       | Aman (OK)  | Aman (OK)  |
| 3  | 0,75 H  | 1,780                          | 1,731      | 1,2       | Aman (OK)  | Aman (OK)  |
| 4  | 1,00 H  | 2,266                          | 2,203      | 1,2       | Aman (OK)  | Aman (OK)  |

(Sumber: Perhitungan Penulis, 2025)

### 3. Alternatif 2



**Gambar 4. 38** *Upstream* Alternatif 2 Gempa OBE 0,25 Y/H



**Gambar 4. 39** *Downstream* Alternatif 2 Gempa OBE 0,25 Y/H

Berdasarkan hasil analisis stabilitas kondisi alternatif 2 dengan gempa OBE bendungan menggunakan program didapatkan nilai *Safety of Factor*, ditunjukkan Tabel 4.11 :

**Tabel 4. 12** Rangkuman Nilai *Factor of Safety* Alternatif 2 Gempa OBE

| No | Kondisi | Nilai FS MAN (Muka Air Normal) |            |           | Keterangan |            |
|----|---------|--------------------------------|------------|-----------|------------|------------|
|    |         | Upstream                       | Downstream | Syarat FS | Upstream   | Downstream |
| 1  | 0,25 H  | 1,498                          | 2,031      | 1,2       | Aman (OK)  | Aman (OK)  |
| 2  | 0,50 H  | 1,442                          | 1,664      | 1,2       | Aman (OK)  | Aman (OK)  |
| 3  | 0,75 H  | 1,792                          | 1,731      | 1,2       | Aman (OK)  | Aman (OK)  |
| 4  | 1,00 H  | 2,280                          | 2,207      | 1,2       | Aman (OK)  | Aman (OK)  |

(Sumber: Perhitungan Penulis, 2025)

#### 4.4.3 Kondisi MAN Dengan Beban Gempa MDE

Pada kondisi MAN (Muka Air Normal) dengan beban gempa termodifikasi yakni gempa MDE, adapun nilai koefisien ditunjukkan pada Tabel 4.12:

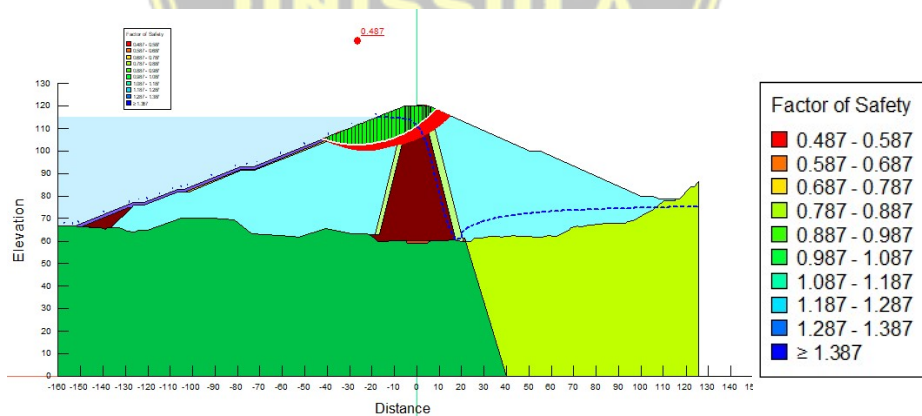
**Tabel 4. 13** Nilai Koefisien Termodifikasi Beban Gempa MDE

| Y/H   | 0,25<br>(g) | 0,50<br>(g) | 0,75<br>(g) | 1,00<br>(g) |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $K_h$ | 0,728       | 0,607       | 0,554       | 0,500       |
| $K_v$ | 0,485       | 0,405       | 0,369       | 0,333       |

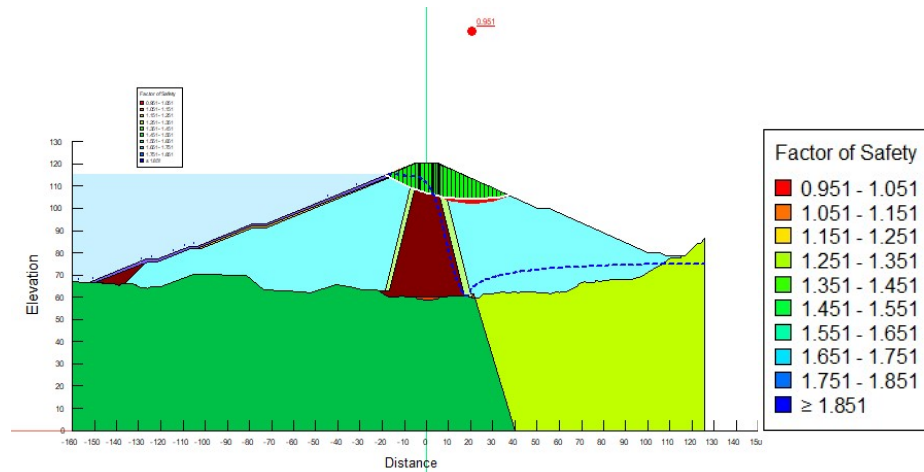
(Sumber: Perhitungan Penulis, 2025)

Kondisi MAN (*Normal Water Level*) terhadap gempa bumi dianalisis pada alternatif eksisting, alternatif 1, dan alternatif 2, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.40 sampai dengan Gambar 4.41 berikut ini:

##### 1. Eksisting



**Gambar 4. 40** *Upstream* Eksisting Gempa MDE 0,25 Y/H



**Gambar 4. 41** Downstream Eksisting Gempa MDE 0,25 Y/H

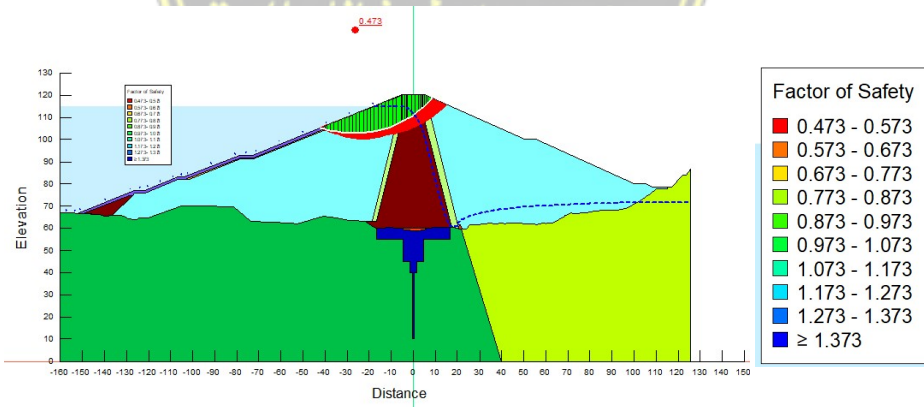
Berdasarkan hasil analisis stabilitas kondisi eksisting dengan gempa MDE pada bendungan menggunakan program didapatkan nilai *Safety of Factor*, ditunjukkan Tabel 4.12:

**Tabel 4. 14** Rangkuman Nilai *Factor of Safety* Eksisting Gempa MDE

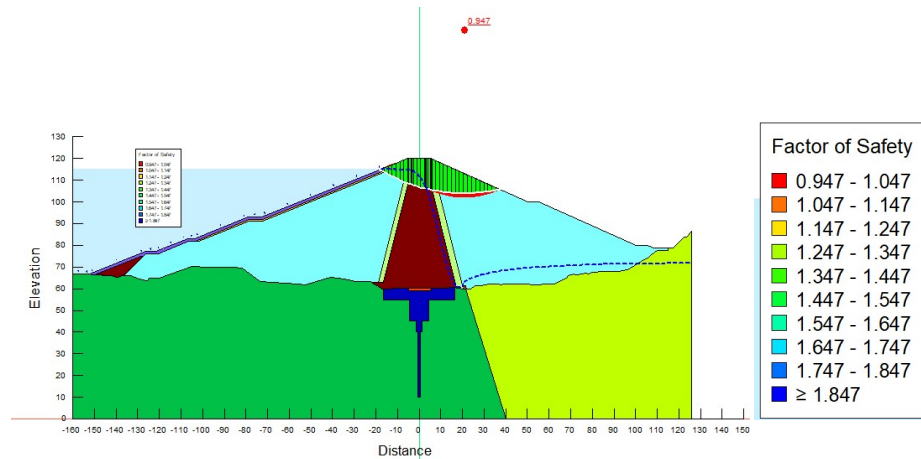
| No | Kondisi | Nilai FS MAN (Muka Air Normal) |            |           | Keterangan |            |
|----|---------|--------------------------------|------------|-----------|------------|------------|
|    |         | Upstream                       | Downstream | Syarat FS | Upstream   | Downstream |
| 1  | 0,25 H  | 0,487                          | 0,951      | 1         | Bahaya(NG) | Bahaya(NG) |
| 2  | 0,50 H  | 0,502                          | 0,864      | 1         | Bahaya(NG) | Bahaya(NG) |
| 3  | 0,75 H  | 0,613                          | 0,954      | 1         | Bahaya(NG) | Bahaya(NG) |
| 4  | 1,00 H  | 1,120                          | 1,170      | 1         | Aman (OK)  | Aman (OK)  |

(Sumber: Perhitungan Penulis, 2025)

## 2. Alternatif 1



**Gambar 4. 42** Upstream Alternatif 1 Gempa MDE 0,25 Y/H



**Gambar 4. 43** Downstream Alternatif 1 Gempa MDE 0,25 Y/H

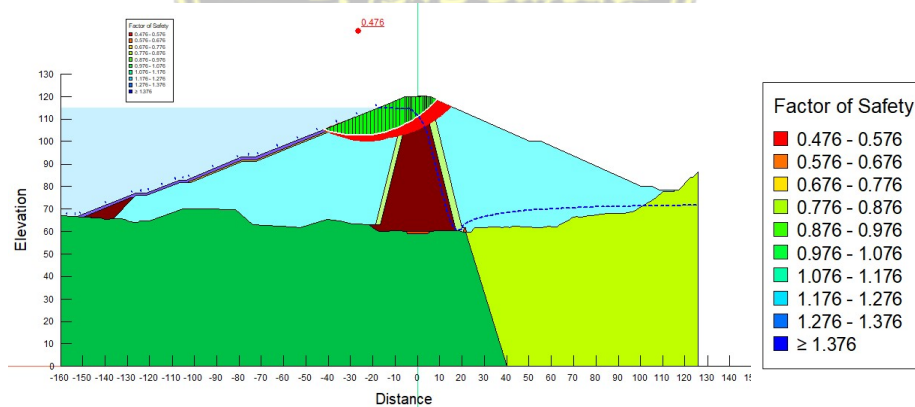
Berdasarkan hasil analisis stabilitas kondisi alternatif 1 dengan gempa MDE pada bendungan menggunakan program didapatkan nilai *Safety of Factor*, ditunjukkan Tabel 4.14:

**Tabel 4. 15** Rangkuman Nilai *Factor of Safety* Alternatif 1 Gempa MDE

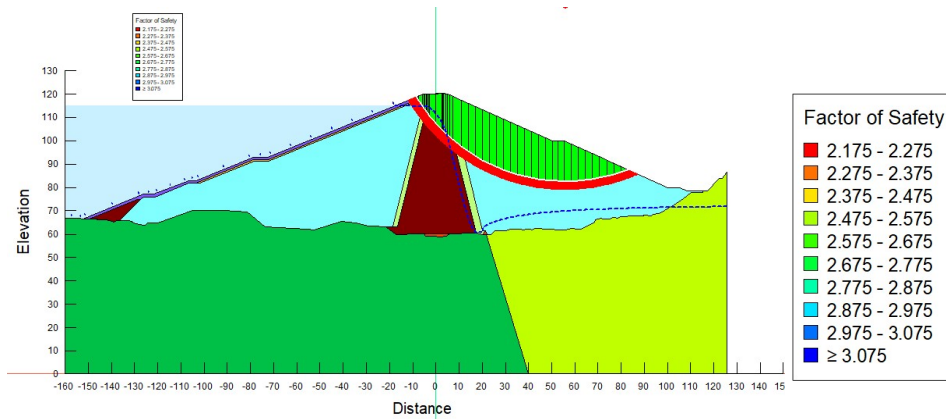
| No | Kondisi | Nilai FS MAN (Muka Air Normal) |            |           | Keterangan |            |
|----|---------|--------------------------------|------------|-----------|------------|------------|
|    |         | Upstream                       | Downstream | Syarat FS | Upstream   | Downstream |
| 1  | 0,25 H  | 0,473                          | 0,947      | 1         | Bahaya(NG) | Bahaya(NG) |
| 2  | 0,50 H  | 0,481                          | 0,863      | 1         | Bahaya(NG) | Bahaya(NG) |
| 3  | 0,75 H  | 0,590                          | 0,953      | 1         | Bahaya(NG) | Bahaya(NG) |
| 4  | 1,00 H  | 1,096                          | 1,187      | 1         | Aman (OK)  | Aman (OK)  |

(Sumber: Perhitungan Penulis, 2025)

### 3. Alternatif 2



**Gambar 4. 44** Upstream Alternatif 2 Gempa MDE 0,25 Y/H



**Gambar 4. 45** *Downstream* Alternatif 2 Gempa MDE 0,25 Y/H

Berdasarkan hasil analisis stabilitas kondisi alternatif 2 dengan gempa MDE menggunakan program didapatkan nilai *Safety of Factor*, ditunjukkan Tabel 4.15 :

**Tabel 4. 16** Rangkuman Nilai *Factor of Safety* Alternatif 2 Gempa MDE

| No | Kondisi | Nilai FS MAN (Muka Air Normal) |            |           | Keterangan |            |
|----|---------|--------------------------------|------------|-----------|------------|------------|
|    |         | Upstream                       | Downstream | Syarat FS | Upstream   | Downstream |
| 1  | 0,25 H  | 0,476                          | 0,948      | 1         | Bahaya(NG) | Bahaya(NG) |
| 2  | 0,50 H  | 0,484                          | 0,863      | 1         | Bahaya(NG) | Bahaya(NG) |
| 3  | 0,75 H  | 0,594                          | 0,953      | 1         | Bahaya(NG) | Bahaya(NG) |
| 4  | 1,00 H  | 1,100                          | 1,188      | 1         | Aman (OK)  | Aman (OK)  |

(Sumber: Perhitungan Penulis, 2025)

#### 4.5 Hasil Analisis Keamanan Terhadap Rembesan

Analisis SEEP/W difokuskan pada pola aliran, kecepatan, serta debit rembesan di Bendungan Jragung. Kecepatan dan debit rembesan ditampilkan melalui grafik *water rate* terhadap *time*, kemudian dihitung untuk memperoleh debit rembesan pada satuan area bentang rembesan. Program SEEP/W menghasilkan output berupa debit rembesan per satuan meter lebar (*Fluxs* = *qf*) yang melintasi tubuh serta fondasi bendungan. Selanjutnya, untuk menentukan total debit rembesan (QT), dapat diterapkan persamaan berikut :

$$Q_T = qf \times L$$

dengan :

$$Q_T = \text{total debit rembesan (m}^3/\text{s)}$$

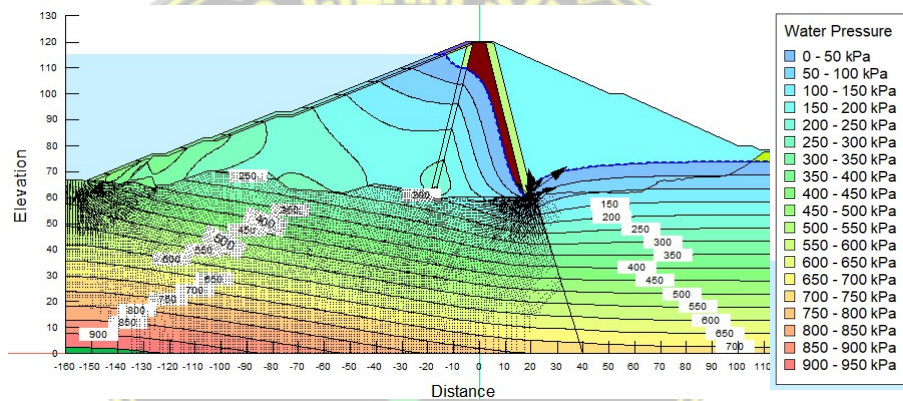
$$qf = \text{debit rembesan Fluxs (m}^3/\text{s/m')}$$

$$L = \text{luas penampang memanjang bendungan (m)}$$

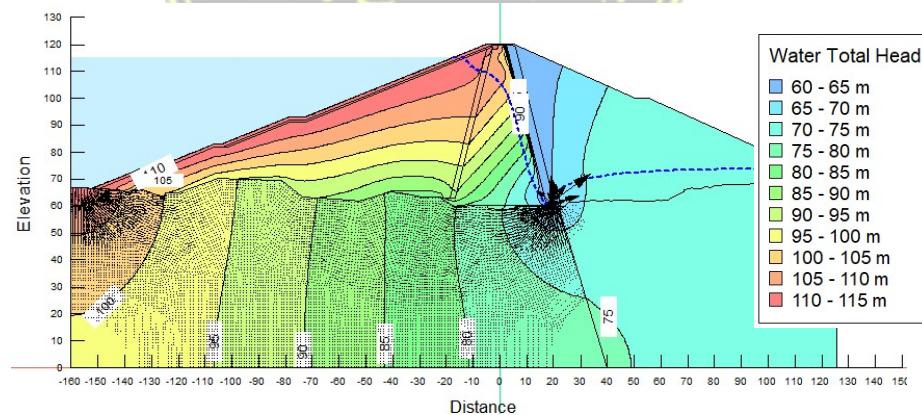
Pertama, Anda harus menghitung debit rembesan per meter lebar (debit  $Flux = qf$ ) pada garis tinjauan. *Gross storage capacity* Bendungan Jragung adalah 90 juta m<sup>3</sup>. Besarnya debit rembesan yang melalui bendungan ( $Q_f$ ) harus lebih kecil dari 0,05% dari *Gross storage capacity* ( $Q_i$ ) (acuan diambil dari RSNI M-02-2002 Meode Analisis Dan Cara Pengendalian Rembesan Air Untuk Bendungan Tipe Urugan), sehingga  $Q_f < 0.01Q_i$ ;  $0.01 Q_i = 45.000 \text{ m}^3/\text{hari}$ .

#### 4.5.1 Eksisting (Tanpa Pengendalian Tambahan)

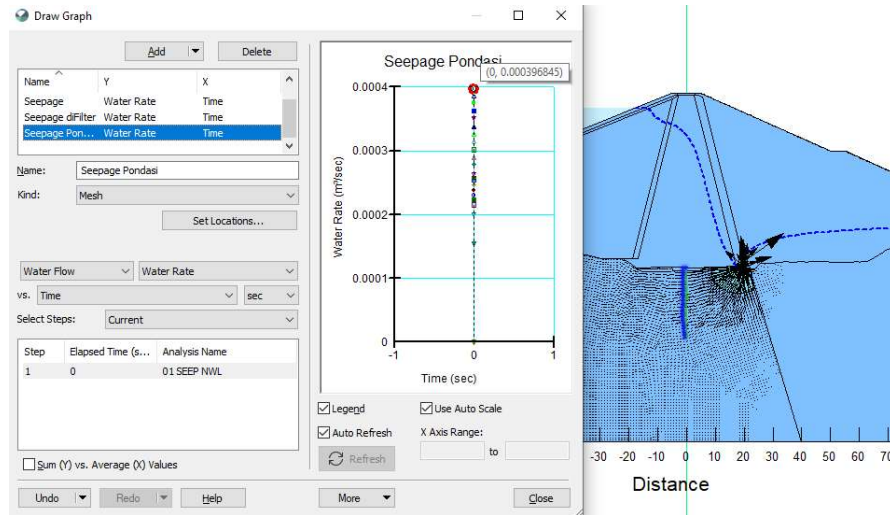
Analisis rembesan eksisting tanpa pengendalian tambahan dengan kondisi MAN (Muka Air Normal) dilakukan analisis untuk mendapatkan besaran debit rembesan di pondasi bendungan. Pada Gambar 4.46 sampai dengan Gambar 4.48 merupakan hasil analisis pemodelan dengan program SEEP/W.



**Gambar 4. 46** *Contour Pore Water Pressure* Eksisiting Kondisi *Steady-State* Muka Air Normal



**Gambar 4. 47** *Contour Water Total Head* Pada Eksisting Kondisi *Steady-State* Muka Air Normal



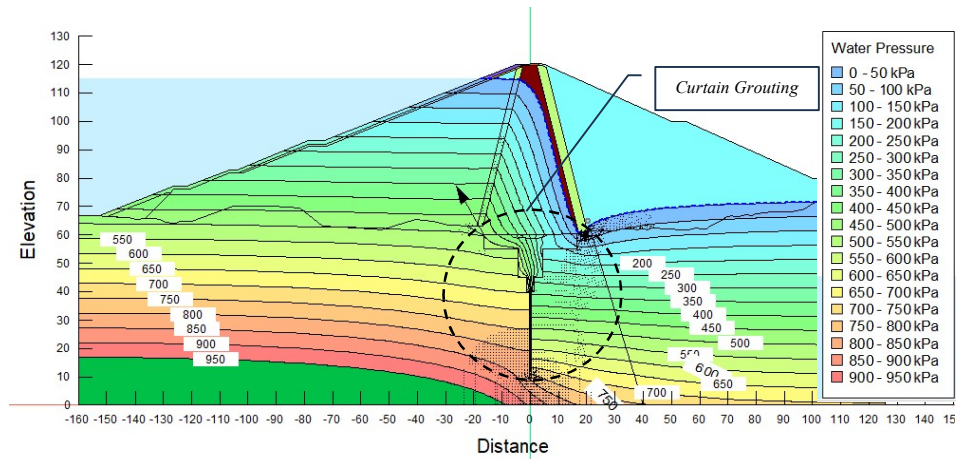
**Gambar 4. 48** Besaran Debit Rembesan Eksisting Muka Air Normal

#### Debit Rembesan

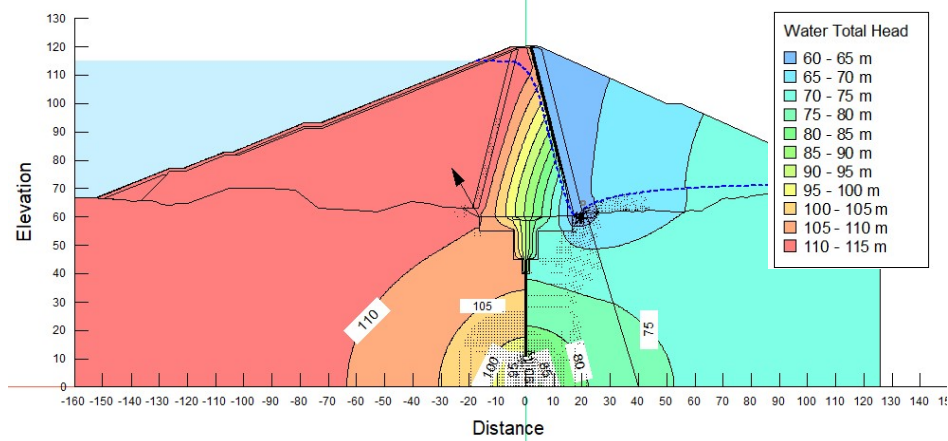
|                                              |                                                                      |                    |            |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------|------------|
| Debit rembesan ( $q_f$ )                     | =                                                                    | $3,97e-04$         | $m^3/s/m'$ |
| Panjang penampang rembesan bendungan ( $L$ ) | =                                                                    | 1450               | m          |
| Debit rembesan ( $Q_T$ )                     | =                                                                    | $5,75e-01$         | $m^3/s$    |
|                                              | =                                                                    | 49716,74           | $m^3/day$  |
|                                              | =                                                                    | $5,75e+02$         | ltr/sec    |
|                                              | =                                                                    | $6,66e-03$         | ltr/day    |
| Gross storage                                | =                                                                    | 90000000           | $m^3$      |
| Syarat rembesan < 0,05% Gross storage        |                                                                      |                    |            |
| 0,05% Gross storage                          | =                                                                    | 45000              | $m^3/day$  |
|                                              | <b>49716,74 <math>m^3/day</math> &gt; 45000 <math>m^3/day</math></b> | <b>Bahaya (NG)</b> |            |

#### 4.5.2 Alternatif 1 (Dengan Pengendalian *Curtain Grouting*)

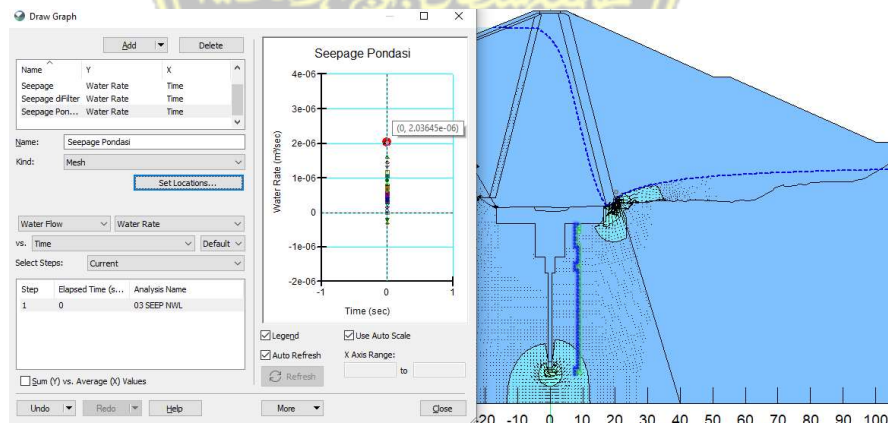
Analisis rembesan alternatif 1 dilakukan terhadap pengendalian *curtain grouting* ada dibawah material inti. Analisis dilakukan untuk mengetahui besaran debit rembesan di pondasi bendungan. Pada Gambar 4.49 sampai dengan Gambar 4.51 merupakan hasil analisis pemodelan dengan program SEEP/W.



**Gambar 4. 49** *Contour Pore Water Pressure* Pada Alternatif 1 Kondisi *Steady-State* Muka Air Normal



**Gambar 4. 50** *Contour Water Total Head* Pada Alternatif 1 Kondisi *Steady-State* Muka Air Normal



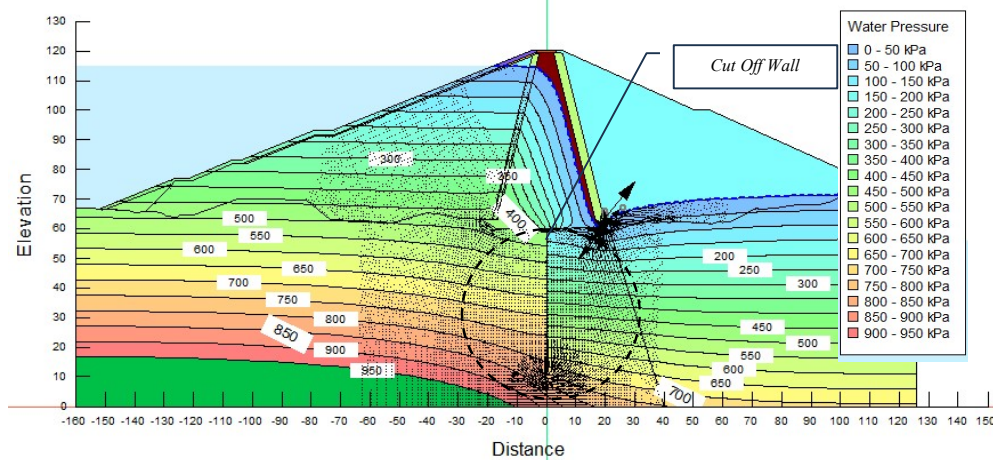
**Gambar 4. 51** Besaran Debit Rembesan Alternatif 1 Muka Air Normal

### Debit Rembesan

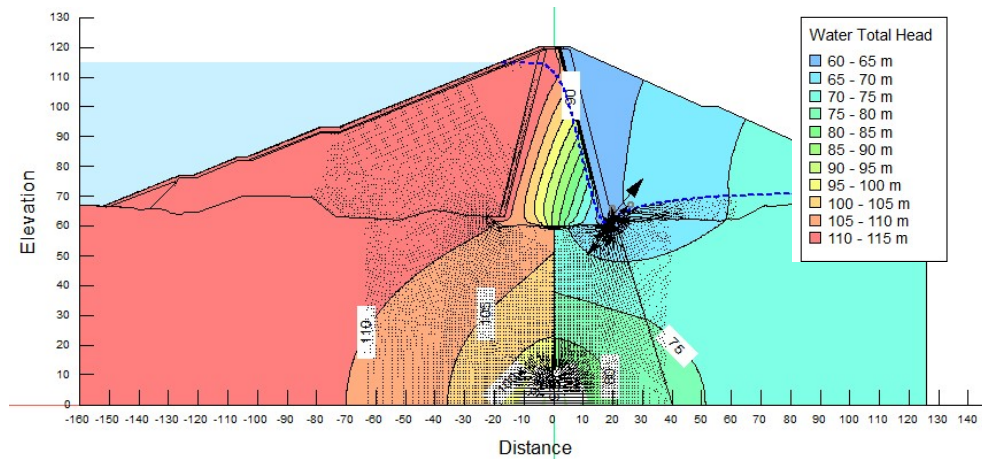
|                                          |   |                            |                                       |
|------------------------------------------|---|----------------------------|---------------------------------------|
| Debit rembesan (qf)                      | = | 2,04-06                    | m <sup>3</sup> /s/m'                  |
| Panjang penampang rembesan bendungan (L) | = | 1450                       | m                                     |
| Debit rembesan (Q <sub>T</sub> )         | = | 2,95e-03                   | m <sup>3</sup> /s                     |
|                                          | = | 255.13                     | m <sup>3</sup> /day                   |
|                                          | = | 2.95e+00                   | ltr/sec                               |
|                                          | = | 3,42e-05                   | ltr/day                               |
| Gross storage                            | = | 90000000                   | m <sup>3</sup>                        |
| Syarat rembesan < 0,05% Gross storage    |   |                            |                                       |
| 0,05% Gross storage                      | = | 45000                      | m <sup>3</sup> /day                   |
|                                          |   | 255.13 m <sup>3</sup> /day | < 45000 m <sup>3</sup> /day Aman (OK) |

### 4.5.3 Alternatif 2 (Dengan Pengendalian *Cut Off Wall*)

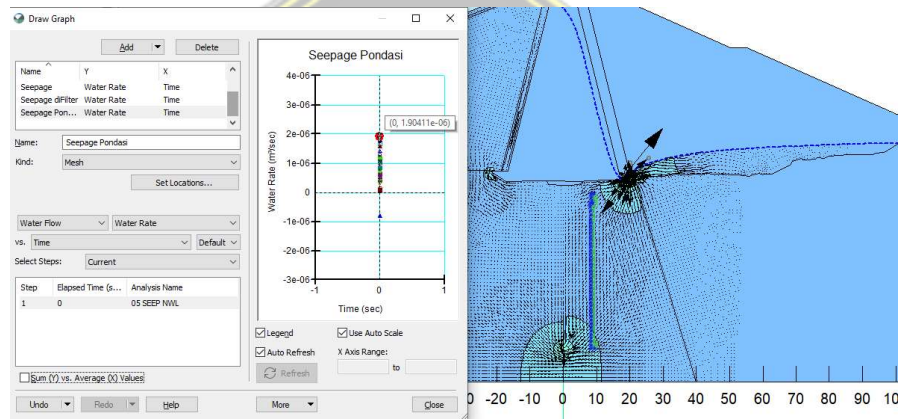
Analisis rembesan alternatif 2 pada kondisi MAN (Muka Air Normal) dilakukan analisis dengan *Cut off wall* ada dibawah material inti. Dalam analisis ini, koefisien permeabilitas *Cut off wall* digunakan dengan merujuk pada data karakteristik material yang tercantum pada Tabel 2.6 Karakteristik Material Untuk *Cut off Wall*, ICOLD (2005). Pada Gambar 4.52 sampai dengan Gambar 4.54 merupakan hasil analisis pemodelan dengan program SEEP/W.



**Gambar 4. 52** *Contour Pore Water Pressure* Alternatif 1 Kondisi *Steady-State*  
Muka Air Normal



**Gambar 4. 53** *Contour Water Total Head Alternatif 1 Kondisi Steady-State Muka Air Normal*



**Gambar 4. 54** *Besaran Debit Rembesan Alternatif 2 Muka Air Normal*

### Debit Rembesan

$$\begin{aligned}
 \text{Debit rembesan (qf)} &= 1,90\text{e-}06 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}' \\
 \text{Panjang penampang rembesan bendungan (L)} &= 1450 \text{ m} \\
 \text{Debit rembesan (Q}_T\text{)} &= 2,76\text{e-}03 \text{ m}^3/\text{s} \\
 &= 238,55 \text{ m}^3/\text{day} \\
 &= 2,76\text{e+}00 \text{ ltr/sec} \\
 &= 3,20\text{e-}05 \text{ ltr/day} \\
 \text{Gross storage} &= 90000000 \text{ m}^3 \\
 \text{Syarat rembesan} &< 0,05\% \text{ Gross storage} \\
 0,05\% \text{ Gross storage} &= 45000 \text{ m}^3/\text{day} \\
 238,55 \text{ m}^3/\text{day} &< 45000 \text{ m}^3/\text{day} \text{ Aman (OK)}
 \end{aligned}$$

#### 4.6 Hasil Analisis Keamanan Terhadap *Piping*

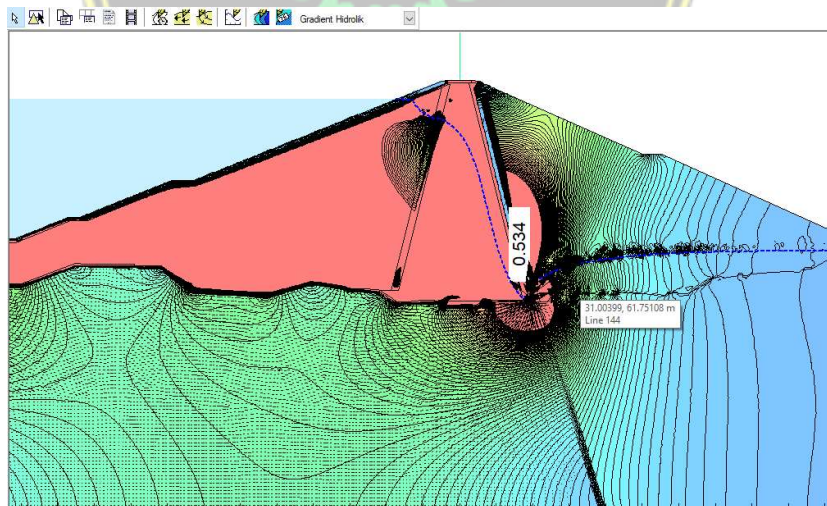
Hasil analisis SEEP/W dapat diketahui juga nilai gradien hidrolis ( $i_{exit}$ ) / ( $i_{cal}$ ) dari pemodelan program. Dimana nilai besaran gradien hidrolis yang paling besar nantinya akan diketahui terjadinya *piping*. Kemudian mencari besaran nilai gradien hidrolis kritis ( $i_{cr}$ ), dapat dilakukan diantaranya sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Specific gravity } (Gs) &= 2477 \\ e &= 0,681 \\ i_{cr} &= \frac{(Gs - 1)}{(1 + e)} = \frac{2477 - 1}{1 + 0,681} = 0,878 \end{aligned}$$

##### 4.6.1 Eksisting (Tanpa Pengendalian Tambahan)

Dari hasil analisis SEEP/W pada eksisting nilai gradien hidrolis ( $i_{exit}$ )/( $i_{cal}$ ) dan kemudian mencari besaran nilai gradien hidrolis kritis ( $i_{cr}$ ), dapat dilakukan diantaranya sebagai berikut :

$$\begin{aligned} i_{cr} &= \frac{(Gs - 1)}{(1 + e)} = \frac{2477 - 1}{1 + 0,681} = 0,878 \\ i_{cal} &= 0,534 \end{aligned}$$



**Gambar 4. 55** Gradien Hidrolis Eksisting Kondisi Muka Air Normal

$$FS \text{ Piping} > 4$$

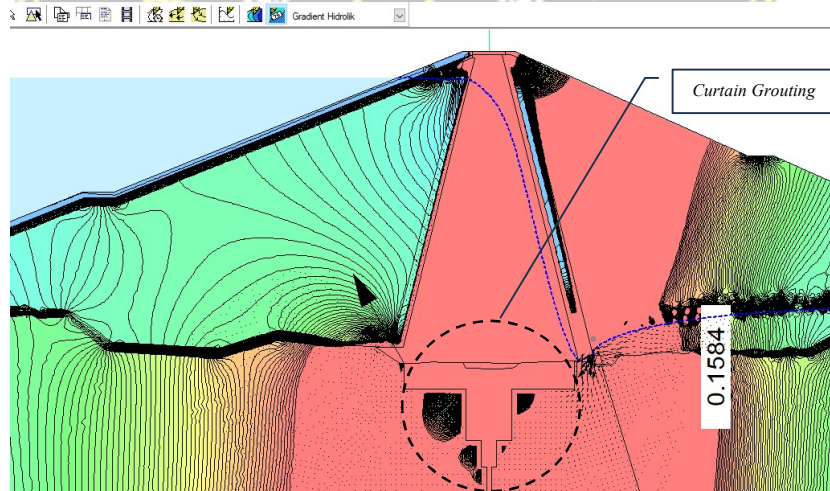
$$\begin{aligned} FS \text{ Piping} &= \frac{i_{cr}}{i_{cal}} \\ &= \frac{0,878}{0,536} \\ &= 1,645 \end{aligned}$$

$4 > 1,645$  Tidak memenuhi syarat

#### 4.6.2 Alternatif 1 (Dengan Pengendalian *Curtain Grouting*)

Dari hasil analisis SEEP/W pada alternatif 1 nilai gradien hidrolik ( $i_{exit}$ )/( $i_{cal}$ ) dan kemudian mencari besaran nilai gradien hidrolik kritis ( $i_{cr}$ ), dapat dilakukan diantaranya sebagai berikut :

$$\begin{aligned} i_{cr} &= \frac{(Gs - 1)}{(1 + e)} = \frac{2477 - 1}{1 + 0,681} = 0,878 \\ i_{cal} &= 0,1584 \end{aligned}$$



**Gambar 4. 56** Gradien Hidrolik Alternatif 1 Kondisi Muka Air Normal

$$FS \text{ Piping} > 4$$

$$\begin{aligned} FS \text{ Piping} &= \frac{i_{cr}}{i_{cal}} \\ &= \frac{0,878}{0,1584} \\ &= 5,546 \end{aligned}$$

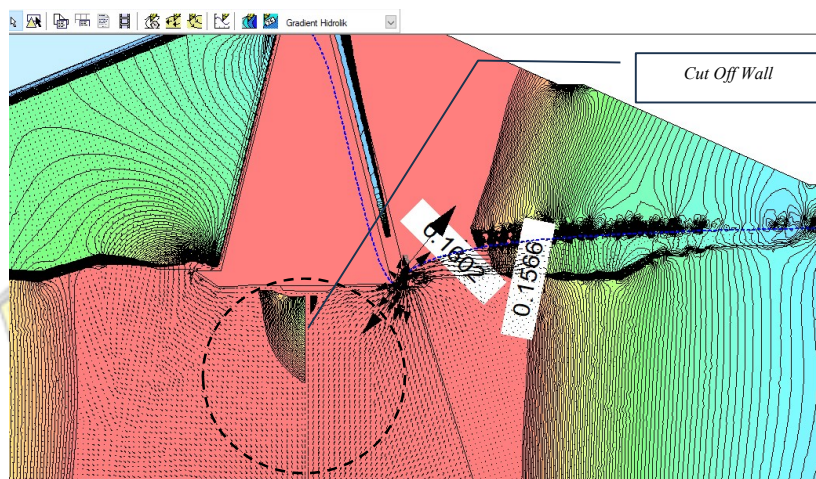
$4 < 5,546$  Memenuhi syarat

#### 4.6.3 Alternatif 2 (Dengan Pengendalian *Cut Off Wall*)

Dari hasil analisis SEEP/W pada alternatif 2 nilai gradien hidrolik ( $i_{exit}$ )/( $i_{cal}$ ) dan kemudian mencari besaran nilai gradien hidrolik kritis ( $i_{cr}$ ), dapat dilakukan diantaranya sebagai berikut :

$$i_{cr} = \frac{(G_s - 1)}{(1 + e)} = \frac{2477 - 1}{1 + 0,681} = 0,878$$

$$i_{cal} = 0,1602$$



**Gambar 4. 57** Gradien Hidrolik Alternatif 2 Kondisi Muka Air Normal

$$FS \text{ Piping} > 4$$

$$FS \text{ Piping} = \frac{i_{cr}}{i_{cal}} = \frac{0,878}{0,1602} = 5,484$$

**4 < 5,484 Memenuhi syarat**

#### 4.7 Rekapitulasi *Safety of Factor* Stabilitas, Rembesan dan *Piping*

Adapun untuk rekapitulasi *safety of factor* disajikan dalam bentuk grafik, Pada Tabel 4.17 merupakan hasil analisis pemodelan dengan *Finite Element*.

#### 4.7.1 Stabilitas

Hasil analisis stabilitas dengan tinjauan pondasi dengan program pada kondisi *Normal Water Level*, ditunjukkan Tabel 4.16 :

**Tabel 4. 17** Rekapitulasi Stabilitas *Safety of Factor*

| No | Deskripsi              | Kondisi | Normal Water Level (NWL) |            |              |            |              |            |           |             | Keterangan  |            |
|----|------------------------|---------|--------------------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|-----------|-------------|-------------|------------|
|    |                        |         | Eksisting                |            | Alternatif 1 |            | Alternatif 2 |            | Syarat FK |             |             |            |
|    |                        |         | Upstream                 | Downstream | Upstream     | Downstream | Upstream     | Downstream | Upstream  | Downstream  | Upstream    | Downstream |
| 1  | Tanpa Gempa            |         | 3.039                    | 2.189      | 2.128        | 2.174      | 2.143        | 2.175      | 1.5       | AMAN (OK)   | AMAN (OK)   |            |
| 2  | Beban Gempa OBE 0,25 H | 0,25 H  | 1.903                    | 2.083      | 1.491        | 2.030      | 1.498        | 2.031      | 1.2       | AMAN (OK)   | AMAN (OK)   |            |
| 3  | Beban Gempa OBE 0,50 H | 0,50 H  | 2.034                    | 1.687      | 1.432        | 1.664      | 1.442        | 1.664      | 1.2       | AMAN (OK)   | AMAN (OK)   |            |
| 4  | Beban Gempa OBE 0,70 H | 0,75 H  | 2.653                    | 1.755      | 1.780        | 1.731      | 1.792        | 1.731      | 1.2       | AMAN (OK)   | AMAN (OK)   |            |
| 5  | Beban Gempa OBE 1,00 H | 1,00 H  | 3.447                    | 2.255      | 2.266        | 2.203      | 2.28         | 2.207      | 1.2       | AMAN (OK)   | AMAN (OK)   |            |
| 6  | Beban Gempa MDE 0,25 H | 0,25 H  | 0.598                    | 0.984      | 0.473        | 0.947      | 0.476        | 0.948      | 1         | BAHAYA (NG) | BAHAYA (NG) |            |
| 7  | Beban Gempa MDE 0,50 H | 0,50 H  | 0.686                    | 0.874      | 0.481        | 0.863      | 0.484        | 0.863      | 1         | BAHAYA (NG) | BAHAYA (NG) |            |
| 8  | Beban Gempa MDE 0,75 H | 0,75 H  | 0.863                    | 0.962      | 0.590        | 0.953      | 0.594        | 0.953      | 1         | BAHAYA (NG) | BAHAYA (NG) |            |
| 9  | Beban Gempa MDE 1,00 H | 1,00 H  | 1.422                    | 1.204      | 1.096        | 1.187      | 1.1          | 1.188      | 1         | AMAN (OK)   | AMAN (OK)   |            |

(Sumber: Perhitungan Penulis, 2025)

Berdasarkan rekapitulasi Tabel 4.16, pada kondisi *Normal Water Level* tanpa beban gempa dan dengan beban gempa OBE, seluruh kondisi pada Kondisi Eksisting, Alternatif 1, dan Alternatif 2 baik di hulu maupun di hilir memenuhi nilai *Safety Factor*. Demikian pula, pada kondisi *Normal Water Level* dengan beban gempa MDE 1,00H, seluruh skenario tersebut juga memenuhi persyaratan *Safety Factor*. Namun, untuk kondisi *Normal Water Level* dengan beban gempa MDE 0,25H, 0,50H, dan 0,75H, seluruh skenario pada Eksisting, Alternatif 1, dan Alternatif 2 di bagian hulu maupun hilir tidak memenuhi kriteria *Safety Factor*. Oleh karena itu, diperlukan analisis dinamis lanjutan menggunakan metode Makdisi-Seed (metode alihan tetap) untuk mengevaluasi stabilitas lebih lanjut.

#### 4.7.2 Rembesan

Hasil analisis rembesan dengan tinjauan dipondasi dengan program pada kondisi *Normal Water Level*, ditunjukkan Tabel 4.18 berikut :

**Tabel 4. 18** Rekapitulasi Nilai *Safety of Factor* Rembesan

| No | Deskripsi    | Normal Water Level (NWL) |                                 |          |                           |          |          |          | Gross Storage |             | Keterangan |
|----|--------------|--------------------------|---------------------------------|----------|---------------------------|----------|----------|----------|---------------|-------------|------------|
|    |              | L                        | Water Rate Gradient (GeoStudio) |          |                           |          |          | 100%     | Qh < 0,05 %   |             |            |
|    |              |                          | Debit (qf)                      |          | Total Debit Rembesan (QT) |          |          |          |               |             |            |
|    |              |                          | m3/sec                          | m3/sec   | m3/day                    | ltr/sec  | ltr/day  |          |               | m3          |            |
| 1  | Exsisting    | 1450                     | 3.97E-04                        | 5.75E-01 | 49716.74                  | 5.75E+02 | 6.66E-03 | 90000000 | 45000         | BAHAYA (NG) |            |
| 2  | Alternatif 1 | 1450                     | 2.04E-06                        | 2.95E-03 | 255.13                    | 2.95E+00 | 3.42E-05 | 90000000 | 45000         | AMAN (OK)   |            |
| 3  | Alternatif 2 | 1450                     | 1.90E-06                        | 2.76E-03 | 238.55                    | 2.76E+00 | 3.20E-05 | 90000000 | 45000         | AMAN (OK)   |            |

(Sumber: Perhitungan Penulis, 2025)

Berdasarkan rekapitulasi Tabel 4.16, pada kondisi *Normal Water Level* kondisi pada Eksisting tidak memenuhi nilai batas izin dan tidak aman. Alternatif 1, dan Alternatif 2 memenuhi batas izin dan aman.

#### 4.7.3 Piping

Hasil analisis terhadap *piping* dengan kondisi *Normal Water Level*, ditunjukkan Tabel 4.29 berikut:

**Tabel 4. 19** Rekapitulasi Nilai *Safety of Factor* terhadap *Piping*

| No | Deskripsi    | Normal Water Level (NWL) |               |               | Keterangan  |
|----|--------------|--------------------------|---------------|---------------|-------------|
|    |              | Icr                      | Exit Gradient | Faktor Safety |             |
|    |              |                          |               | 4             |             |
| 1  | Eksisting    | 0.87864366               | 0.534         | 1.645400121   | BAHAYA (NG) |
| 2  | Alternatif 1 | 0.87864366               | 0.1584        | 5.546992831   | AMAN (OK)   |
| 3  | Alternatif 2 | 0.87864366               | 0.1602        | 5.484667069   | AMAN (OK)   |

Berdasarkan rekapitulasi Tabel 4.17, pada kondisi *Normal Water Level* kondisi pada Eksisting tidak memenuhi nilai *Safety of Factor* dan terjadi *piping*. Alternatif 1, dan Alternatif 2 memenuhi nilai *Safety Factor* dan aman terhadap *piping*.



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis Studi Bendungan Jragung STA +700 menarik temuan berikut dari pemeriksaan pada Tugas Akhir ini:

1. Analisis stabilitas pada Eksisting, Alternatif 1, dan Alternatif 2 di hulu dan hilir dengan tinjauan pondasi Kondisi *Normal Water Level* tanpa gempa dan dengan gempa OBE serta MDE 1,00H memenuhi syarat *Safety Factor*. Namun, pada gempa MDE 0,25H, 0,50H, dan 0,75H, seluruh kondisi tersebut tidak memenuhi kriteria, sehingga diperlukan analisis dinamis lanjutan dengan metode Makdisi-Seed.
2. Analisis rembesan Kondisi *Normal Water Level* pada eksisting didapatkan total debit 49716,74 m<sup>3</sup>/day, alternatif 1 didapatkan total debit 255,13 m<sup>3</sup>/day, dan alternatif 2 didapatkan total debit 238,55 m<sup>3</sup>/day dengan batas izin sebesar 45.000 m<sup>3</sup>/day dari ketiga analisis kondisi eksisting tidak memenuhi batas izin tetapi alternatif 1 dan alternatif 2 memenuhi batas izin dan aman.
3. Pada kondisi *Normal Water Level*, Eksisting tidak memenuhi *Safety Factor*, sedangkan Alternatif 1 dan 2 memenuhi kriteria dan aman dari *piping*.

#### 5.2 Saran

Berdasarkan hasil analisis Tugas Akhir ini penulis memberikan saran, diantaranya sebagai berikut:

1. Untuk analisis lebih lanjut, analisis beban gempa dapat dilakukan dengan menggunakan analisis alihan tetap dengan cara Makdisi Seed dan/ analisis respon dinamik.
2. Sebaiknya peneliti berikutnya menambahkan kondisi Muka Air Banjir dan atau *rapid drawdown*.
3. Sebaiknya untuk analisis lanjutan, untuk alternatif 2 yakni *Cut off wall* perlu ditinjau lagi secara detail

## DAFTAR PUSTAKA

- Allan Takwin, G., E. T. A., & Rondonuwu, S. G. (2017). Analisis Kestabilan Lereng Metode Morgenstern-Price (Studi Kasus : Diamond Hill Citraland). *Jurnal Tekno*, 15(0215–9617), 66–76.
- Arifin, M. Z. (2021). *Analisa Pengaruh Pemasangan Pengendalian Rembesan Tambahan Terhadap Stabilitas Bendungan*.  
<https://digilib.uns.ac.id/dokumen/detail/88859/Analisa-Pengaruh-Pemasangan-Pengendalian-Rembesan-Tambahan-Terdapat-Stabilitas-Bendungan>
- Astuti, Y. (2012). *Analisis Rembesan Bendungan Bajulmati Terhadap Bahaya Piping Untuk Perencanaan Perbaikan Pondasi*. Universitas Brawijaya.
- Bowles, J. E. (1992). *Engineering properties of soils and their measurement*.
- BSN. (2016). SNI 8065: Metode Analisis dan Cara Pengendalian Rembesan Air untuk Bendungan Tipe Urugan. *Badan Standarisasi Nasional*.
- Craig, R. F. (1989). Mekanika Tanah (B. Susilo, Ed.; Vol. 4). *Jakarta: Erlangga*.
- Das, B. M. (1985). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip rekayasa geoteknis)*. Penerbit Erlangga.
- Das, B. M. (2011). *Principles of geotechnical engineering*/Braja M. Das, *Cengage Learning, Stamford, CT*.
- Farrasati, S. U., & Nurokhmah, S. (2023). *Program Numerik Pada Bendungan Jragung*. Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
- Fatahillah Noor Miftahudin. (2023). Analisis Stabilitas Dan Rembesan Pada Tubuh Bendung Dengan Variasi Elevasi Tinggi Muka Air. *Jurnal Ekonomi Volume 18, Nomor 1 Maret 201*, 2(1), 41–49.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). Mekanika Tanah I, Edisi 3. *Gramedia Pustaka Utama, Jakarta*.
- Hernández, U. M., E., N.-T. O., Liu, X. L., Sandoval, E. M., & G., F. H. (2008). Seismic Guidelines For Earth and Rock Fill Dams. *14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE), March 2016*

- Hidayawan, A., & Hikmatyar, M. B. (2022). Fungsi *Grouting* Terhadap Bahaya Rembesan, *Piping* Dan Uplift Pada Bendungan. *Proceeding Science and ...*, 7(Sens 7). <https://conference.upgris.ac.id/index.php/sens/article/view/3465>
- Hidayawan, A., Kurniawan, A., Adhi, B. W., Setiyanto, B., & Rahayu, H. (2024). Analisis Penentuan Parameter Gempa Untuk Perhitungan Stabilitas Bendungan. *MoDuluS Media Komunikasi Dunia Ilmu Sipil*, 6(1), 1–7. <https://doi.org/10.32585/modulus.v6i1.5529>
- Lee, C.-M., Hamm, S.-Y., Jeon, H.-T., Kim, M., Kim, H.-K., & Kim, K. (2017). Water policy of Korea for supplying safe groundwater in rural areas. *Water*, 9(7), 508.
- Muhammad, S. (2021). *Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Saradan*(*Seepage Analysis and Slope Stability of Saradan DAM*).
- Pd t-14-2004-A. (2004). Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa. *Pedoman Konstruksi Dan Bangunan*, 1–93.
- Price, V. E., & Morgenstern, N. R. (1968). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*, 18(3), 393–394.
- PuSGeN, T. (2022). *Disusun oleh : Pusat Studi Gempa Nasional Kerjasama :*
- Rovik, M. (2024). *Kajian Penempatan Piezometer Melalui Simulasi Potensi Rembesan Pada Bendungan Jragung*. Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
- SANI, A. (2008). *Analisis Kapasitas Waduk Dengan Menggunakan Metode Ripple Dan Metode Behavior*. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Setyadi, A., Suharyanto, S., & Edhisono, S. (2023). Analisis Respon Tekanan Air Pori Terhadap Muka Air Waduk Pada Bendungan Jatibarang: Analysis of Pore Water Pressure Response to Reservoir Water Level in Jatibarang Dam. *Bentang: Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 11(1), 67–80.
- SNI. (2016). *SNI 8064:2016 Tentang Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Tipe Urugan*.
- Sosrodarsono, S., & Takeda, K. (1977). *Bendungan type urugan*. PT Pradnya Paramita, Jakarta.
- Sosrodarsono, S., & Takeda, K. (1989). *Bendungan Type Urugan*, PT. *Pradya Paramita, Jakarta*.

Sosrodarsono Suyono, I., & Takeda, K. (1981). *Bendungan Type Urugan*. Cetakan.

Srivastava, A. (2011). Geotechnical Instrumentation, Monitoring And Surveillance  
In Earth Dam Safety Programme. *Indian Geotechnical Conference*, 15–17.

