

## KAJIAN KEAMANAN METODE PEKERJAAN TIMBUNAN ZONA INTI SANDARAN KANAN *MAIN DAM* BENDUNGAN CIJUREY

Devina Kusuma Widiastuti<sup>1</sup>, Bagas Yoga Pratama<sup>2\*</sup>, Muhamad Wildan Zaky<sup>3</sup>, dan Tria Fajri Jauhari<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Bangunan Air, Fakultas Vokasi, ITS  
Jl. Raya Menur No.127, Manyar Sabrangan, Kec. Mulyorejo, Surabaya, Jawa Timur 60282

<sup>4</sup> Konsultan Supervisi Konstruksi Pembangunan Bendungan Cijurey

Jl. Babakan Jeruk II, No. 34, Kel. Sukagalih, Kec. Sukajadi, Kota Bandung, Jawa Barat – 40163

E-mail: [devinawashere@gmail.com](mailto:devinawashere@gmail.com)<sup>1</sup>, [bagasyogap@its.ac.id](mailto:bagasyogap@its.ac.id)<sup>2\*</sup>, [mhmd.wildanzaky@gmail.com](mailto:mhmd.wildanzaky@gmail.com)<sup>3</sup> dan

[triafajri@rocketmail.com](mailto:triafajri@rocketmail.com)

(\*) Penulis Korespondensi

(Artikel dikirim: 16 Januari 2026, Direvisi: 10 April 2026, Diterima: 3 Mei 2026)

DOI: <http://dx.doi.org/10.30742/axial.v14i1.5171>

**ABSTRAK:** Pekerjaan penimbunan zona inti Bendungan Cijurey dilaksanakan mulai dari sandaran kanan dan sandaran kiri bendungan, tidak seperti bendungan pada umumnya yang dimulai dari garis as sungai. Metode penimbunan tersebut menimbulkan potensi bahaya longsor dan deformasi selama pelaksanaan pekerjaan, yang apabila terjadi dapat membahayakan pekerjaan, struktur tubuh bendungan, serta pipa instrumen yang menjadi fokus utama studi ini karena bersifat mudah rusak akibat deformasi. Oleh karena itu, studi ini dilakukan untuk mengevaluasi apakah metode pekerjaan yang direncanakan telah memenuhi syarat keamanan sesuai standar SNI, sekaligus memberikan alternatif metode pekerjaan agar pelaksanaannya lebih efektif. Analisis stabilitas dan deformasi dilakukan menggunakan perangkat lunak GeoStudio 2023 dengan memanfaatkan SIGMA/W dan SLOPE/W untuk masing-masing analisis. Hasil analisis SIGMA/W menunjukkan bahwa deformasi terbesar sebesar 0,077 m terjadi pada arah horizontal. Analisis stabilitas menggunakan SLOPE/W menunjukkan bahwa seluruh skenario penimbunan dinyatakan aman untuk dilaksanakan, sedangkan metode pekerjaan dengan kombinasi kemiringan 1:5 dan 1:2 memberikan hasil yang lebih efektif karena mengurangi pekerjaan berulang.

**KATA KUNCI :** aman, deformasi, efektif, lereng, stabilitas

**ABSTRACT:** The core zone embankment work of the Cijurey Dam was carried out from the right and left abutments rather than from the river axis, as is commonly practiced in dam construction. This embankment method introduces potential risks of slope failure and deformation during construction, which could endanger the ongoing work, the dam body structure, and the instrumentation pipes. Instrumentation pipes are the primary focus of this study because they are particularly vulnerable to damage caused by deformation. Therefore, this study aims to evaluate whether the planned construction method satisfies the safety requirements of the Indonesian National Standard (SNI) while also proposing alternative construction methods to improve implementation effectiveness. Stability and deformation analyses were conducted using GeoStudio 2023, specifically SIGMA/W for deformation analysis and SLOPE/W for stability analysis. Results from SIGMA/W indicate that the maximum deformation of 0,077 m occurs in the horizontal direction. Meanwhile, the stability analysis using SLOPE/W indicates that all embankment scenarios meet the required safety criteria. Among the evaluated methods, the construction approach combining 1:5 and 1:2 slopes provides a more efficient solution by reducing repetitive construction activities.

**KEYWORD :** deformation, effective, safe, slope, stability

### 1. PENDAHULUAN

Bendungan Cijurey terletak di Kabupaten Bogor Jawa Barat, bendungan bertipe urugan random tanah dengan inti tegak di tengah dengan tinggi bendungan dari galian 77 meter dan panjang puncak bendungan 625 meter. Manfaat bendungan tersebut yakni untuk menyelesaikan masalah banjir di hilir sungai Citarum, menjamin kelangsungan ketersediaan air untuk areal irigasi

D.I. Cihoe Cikumpeni seluas 1486 ha pada musim kemarau dan areal irigasi pengembangan seluas 561 ha di Kabupaten Bogor, penyediaan air baku domestik dan industri sebesar 710 liter/detik dan Obyek pariwisata. Bendungan Cijurey memiliki total tampungan mencapai 17,07 juta m<sup>3</sup> dan tampungan bersih 9,76 juta m<sup>3</sup>. Bendungan Cijurey memiliki potensi pemanfaatan yang besar. Oleh karena itu,



## KAJIAN KEAMANAN METODE PEKERJAAN TIMBUNAN ZONA INTI SANDARAN KANAN MAIN DAM BENDUNGAN CIJUREY

(Devina K. Widiastuti, Bagas Y. Pratama, Muhamad W. Zaky , dan Tria F. Jauhari)

Pengelolaan aliran air dari waduk sangat krusial untuk memastikan distribusi air yang merata, efisien, dan berkelanjutan (Sabrina et al., 2025). Di sisi lain, metode ini memiliki risiko konstruksi yang tidak kecil, mengingat zona inti merupakan elemen kedap utama yang kualitasnya sangat bergantung pada plastisitas, permeabilitas rendah, dan pencapaian kadar air optimum selama pemadatan.. Kualitas tanah merupakan faktor kunci karena secara langsung menentukan tingkat keamanan, kapasitas dukung struktur, serta umur layanan bendungan (Kamila & Putri, 2025).

Bahan kedap air adalah elemen penting dalam pembangunan bendungan urugan. Jenis serta stabilitas bendungan sangat dipengaruhi oleh karakteristik, kualitas, dan kuantitas bahan yang tersedia untuk digunakan sebagai material pada zona kedap air (Sosrodarsono, 2016), termasuk untuk Bendungan Cijurey. Zona inti memiliki desain yang dapat tegak (seperti Bendungan Makio di Jepang) atau miring (seperti Bendungan Gando di Jepang). Ini berfungsi sebagai lapisan kedap air utama untuk mencegah rembesan dari waduk ke hilir (Sosrodarsono, 2016). Material untuk zona inti harus dipilih dengan kriteria ketat. Menurut Hura & Gulo, (2024) seperti nilai indeks plastisitas yang memadai (di atas 15), permeabilitas sangat rendah (orde  $10^{-7}$  cm/detik hingga  $10^{-6}$  cm/detik). Selain itu, kadar air material harus dijaga agar mendekati nilai optimum demi mencapai kepadatan maksimum saat proses pemadatan di lapangan (Affandi, 2014).

Pekerjaan penimbunan zona inti Bendungan Cijurey dilaksanakan dari sandaran kanan dan kiri *main dam* dengan kemiringan tertentu yang dikhawatirkan memiliki potensi longsor serta deformasi besar akibat metode pekerjaan yang dapat merusak pipa instrumen. Kekhawatiran tersebut didasari oleh beberapa faktor, antara lain kadar air selama proses penimbunan, beban alat berat yang beroperasi di atas timbunan, serta potensi gempa yang dapat memengaruhi kestabilan lereng. Potensi ketidakstabilan lereng bendungan sangat linier dengan ketinggian bendungan (Ardiansyah & Khurtumi, 2022). Menurut data statistik, sekitar 6% kegagalan bendungan di seluruh dunia disebabkan oleh ketidakstabilan lereng (Bridle, n.d.). Beberapa penelitian sebelumnya mengenai tekanan air pori menunjukkan bahwa stabilitas lereng dipengaruhi oleh keberadaan tekanan air pori atau rembesan dalam tanah, kekuatan geser tanah dan geometri lereng (Hakim et al., 2025). Pemasangan instrumen geoteknik, baik selama tahap konstruksi maupun pada struktur eksisting, memerlukan perhatian khusus karena kesalahan

dalam pemasangan dapat menghasilkan data yang tidak akurat, tampilan data yang keliru, dan bahkan memengaruhi kestabilan struktur (Kementerian PUPR, 2017). Metode pelaksanaan pemasangan instrumen juga bergantung pada parameter yang dipantau, kondisi lapangan, dan jenis instrumen yang digunakan (Kementerian PUPR, 2017). Pada tahap awal, pelaksanaan pembangunan zona inti Bendungan Cijurey dirancang dengan kemiringan lereng 1:3, di mana setiap lereng memiliki tinggi lima meter dan dilengkapi berm selebar dua meter. Namun, berdasarkan rekomendasi teknis dari Balai Teknik Bendungan (BTB), kemiringan tersebut perlu diubah melalui proses pengupasan ulang menjadi 1:5 sebelum pekerjaan pada Paket 1 dapat dilanjutkan dan dihubungkan. Dengan adanya perubahan ini, diperlukan analisis stabilitas dan deformasi lereng untuk menilai potensi kegagalan yang dapat memengaruhi integritas struktur serta berpotensi menyebabkan kerusakan pada pipa instrumen yang terpasang.

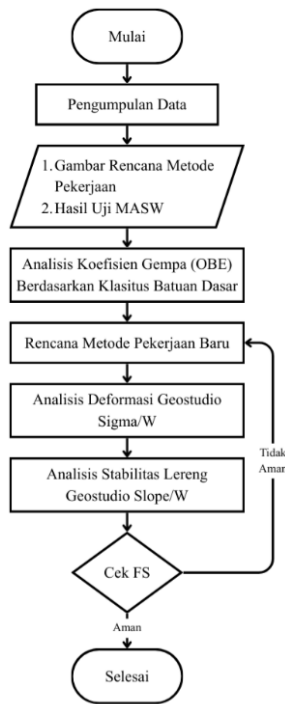
### 2. METODOLOGI

Studi ini menerapkan pendekatan studi kasus dengan merujuk pada data aktual dari proyek pembangunan Bendungan Cijurey. Dalam pelaksanaannya, terdapat perubahan desain pada zona inti sandaran kanan, yaitu kemiringan lereng yang semula direncanakan 1:3 diubah menjadi 1:5 berdasarkan rekomendasi teknis dari Balai Teknik Bendungan (BTB). Perubahan ini berpotensi memengaruhi stabilitas lereng serta deformasi pada struktur timbunan sehingga diperlukan analisis untuk mengevaluasi keamanan desain dan metode pelaksanaan pekerjaan terhadap potensi *sliding* serta deformasi yang mungkin terjadi.

#### A. Tahapan Analisa

Tahapan analisis dapat dilihat pada **Gambar 1** dimana diawali dengan pengumpulan data berupa gambar rencana metode pekerjaan serta hasil uji MASW. Berikutnya dilakukan perhitungan koefisien gempa (OBE) berdasarkan klasifikasi batuan dasar. Berdasarkan hasil tersebut, disusun metode pekerjaan yang diperbarui, yaitu penyesuaian geometri lereng sekaligus dilakukan pemeriksaan stabilitasnya. Metode yang direncanakan selanjutnya diuji melalui analisis deformasi dengan GeoStudio SIGMA/W, kemudian dilanjutkan dengan evaluasi stabilitas lereng menggunakan GeoStudio SLOPE/W. *Output* analisis tersebut ditinjau pada tahap pemeriksaan Faktor

Keamanan (FK)/*Safety Factor* (SF). Nilai FK didefinisikan sebagai rasio antara beban runtuh dengan beban kerja (Tafsir & Siswoyo, 2024).



**Gambar 1** Diagram Alir

Apabila nilai FS belum memenuhi kriteria aman, tahapan kembali ke penyusunan metode pekerjaan baru untuk dilakukan revisi/perbaikan desain. Sebaliknya, jika FS telah memenuhi kriteria, maka pekerjaan dinyatakan layak dan proses dinyatakan selesai.

**B. Data Tanah**

Data tanah yang digunakan pada studi ini yang disajikan pada **Tabel 1** adalah data yang diperoleh dari hasil *soil investigation* oleh Konsultan Supervisi Proyek Pembangunan Bendungan Cijurey.

**Tabel 1** Data Tanah

| Jenis Material       | $\gamma_{Dry}$   | $\gamma_{Sat}$   | $c$              | $\phi'$ |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|---------|
|                      | t/m <sup>3</sup> | t/m <sup>3</sup> | t/m <sup>2</sup> | de g    |
| Rock Toe             | 2,15             | 2,34             | 0                | 45      |
| Batu Lempung Napalan | 1,79<br>3        | 2,11             | 2,75             | 29      |

(Sumber: *Soil Investigation* Konsultan Supervisi Bendungan Cijurey)

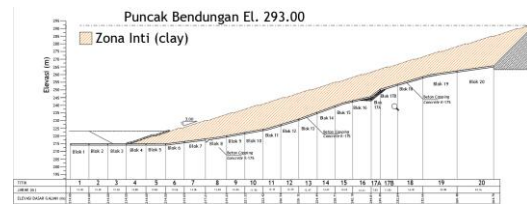
**C. Data Perencanaan**

Selain data tanah yang didapat dari *soil investigation* Konsultan Supervisi, parameter

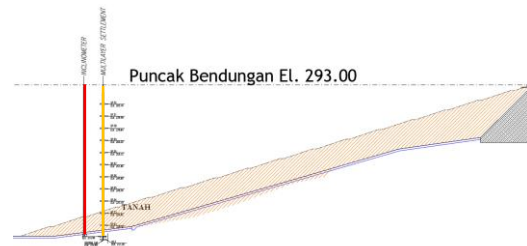
kecepatan rambat geser yang didapat dari uji MASW yang dilakukan konsulttan supervisi pada lokasi as main dam juga diperlukan untuk melakukan analisis stabilitas pada kondisi gempa. Data disajikan sebagai berikut: Vs = 373 m/s sampai dengan 829 m/s

**D. Data Sekunder**

Data didapat dari penyedia jasa paket 2 Bendungan Cijurey yang berupa gambar rencana pekerjaan penimbunan zona inti Bendungan Cijurey yang dapat dilihat pada **Gambar 2**.



(a)



(b)

**Gambar 2** (a) Rencana Pekerjaan Zona Inti (b) Lokasi Instrumen Main Dam (Garis merah merupakan instrumen Inclinomometer dan garis oranye adalah Multilayer Instrumen) (Sumber: Konsultan Supervisi Proyek Pembangunan Bendungan Cijurey)

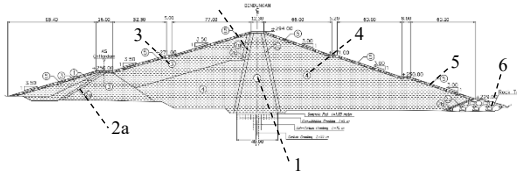
**E. Data Material Timbunan**

Material timbunan yang dipakai pada Bendungan Cijurey terdiri dari 6 zona timbunan yaitu; zona 1 (material inti clay), zona 2a (filter halus), zona 2b (filter kasar), zona 3 (random kerikil tanah), zona 4 (random tanah), zona 5 (rip-rap batu terpilih) dan zona 6 (*rock toe*). Gambar rencana metode pekerjaan dan lokasi instrument dapat dilihat pada **Gambar 3**.

2b

# KAJIAN KEAMANAN METODE PEKERJAAN TIMBUNAN ZONA INTI SANDARAN KANAN MAIN DAM BENDUNGAN CIJUREY

(Devina K. Widiastuti, Bagas Y. Pratama, Muhamad W. Zaky, dan Tria F. Jauhari)



**Gambar 3** Potongan Melintang *Main DAM* (Sumber: Konsultan Supervisi Proyek Pembangunan Bendungan Cijurey)

Material timbunan untuk setiap zona timbunan ini diperoleh dari hasil pengujian di laboratorium oleh Konsultan Supervisi Proyek Pembangunan Bendungan Cijurey. Parameter untuk masing-masing zona timbunan dapat dilihat pada **Tabel 2**.

**Tabel 2** Parameter Material Timbunan

| Hasil Pengujian Laboratorium   |                            | Materia<br>l Inti<br>(Clay) |
|--------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Kepadatan (kN/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_{dry}$             | 12,80                       |
|                                | $\gamma_{wet}$             | 17,77                       |
|                                | $\gamma_{sat}$             | 17,93                       |
|                                | $\gamma_{sub}$             | 7,93                        |
| Specific Gravity               | Gs                         | 2,63                        |
| Angka Pori                     | e                          | 1,05                        |
| Sat. WC                        |                            | 0,51                        |
| Kohesi (kPa)                   | C                          | 17,41                       |
| Kohesi (t/m <sup>2</sup> )     | C                          | 1,78                        |
| Sudut Geser (°)                | $\phi$                     | 32,02                       |
| Permeabilitas (cm/dt)          | k                          | 0,00                        |
| w/c (%)                        |                            | 38,83                       |
| Young Modulus (kPa)            | E                          | 8048                        |
| Compresibility                 | Mv                         | 0,00                        |
| Compresibility                 | Kpa                        | 0,00                        |
| Poisson Ratio                  | $\nu$                      | 0,40                        |
| Shear Modulus (kPa)            | $E G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ | 2874,29                     |

(Sumber: Konsultan Supervisi Proyek Pembangunan Bendungan Cijurey)

## F. Uji MASW

Menurut (Susilanto & Ngadmanto, 2015) diperkuat dengan pernyataan dari (Susilanto, Ngadmanto, Sunardi, & Rohadi, 2019) metode Metode *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) adalah teknik *non-invasif* yang dirancang untuk mengestimasi profil kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) berdasarkan energi gelombang permukaan (Lingkungan & Bencana,

2019). Metode ini sebagai dasar untuk mengkarakterisasi kondisi bawah permukaan. Nilai kecepatan gelombang geser dapat dihitung dengan Persamaan (1) :

$$V_s^{30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \left( \frac{h_i}{v_i} \right)} \quad (1)$$

Dengan :

$h_i$  = ketebalan lapisan tanah kurang dari 30 meter  
 $v_i$  = kecepatan gelombang geser dengan kondisi *level shear strain*  $10^{-5}$  atau kurang

Nilai  $V_s^{30}$  sangat penting, karena merupakan indikator kunci dari respon tanah yang pada umumnya mendominasi amplifikasi gerak tanah akibat gempa (Mutiara Jannah, 2024).

## G. Perhitungan Koefisien Gempa

Metode analisis yang digunakan ditentukan berdasarkan kriteria beban gempa yang diperoleh dari hasil kelas risiko, kemudian dilanjutkan dengan perhitungan koefisien gempa untuk periode kala ulang tertentu. Koefisien gempa dihitung menggunakan Persamaan 2 hingga Persamaan 7.

$$PGA_M = F_{PGA} \times S_B \quad (2)$$

$$K_h = PGA_M / g \quad (3)$$

$$K_o = \alpha_2 \times K_h \quad (4)$$

Dengan :

- $PGA_M$  = Percepatan gempa terkoreksi
- $F_{PGA}$  = Faktor amplifikasi untuk PGA
- $S_B$  = Nilai percepatan gempa dasar dari peta Gempa 2010
- $g$  = Percepatan Gravitasi
- $K_h$  = Koefisien gempa horizontal pada periode T
- $\alpha_2$  = Koreksi pengaruh struktur. Untuk bendungan urugan = 0,5
- $K_o$  = Koefisien gempa terkoreksi di permukaan tanah

Berkaitan dengan nilai kedalaman Y pada setiap bendungan itu berbeda-beda. Hal tersebut dipengaruhi oleh faktor ketinggian bendungan. Menurut Imron, dkk (2017) Semakin tinggi

bendungan maka guncangan gempa bumi juga semakin besar. Untuk perhitungan nilai  $K_h$  dilakukan pada  $Y/H$  : 0,25 ; 0,50 ; 0,75 dan 1 (Sarah et al., 2017).

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

$$K_h = K_o \times \left( 2 - 0,60 \times \left( \frac{Y}{H} \right) \right) \quad (5)$$

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

$$K_h = K_o \times \left( 2,5 - 1,85 \times \left( \frac{Y}{H} \right) \right) \quad (6)$$

Dengan :

$K_h$  = Koefisien gempa pada kedalaman Y dari puncak bendungan

$K_o$  = Koefisien gempa terkoreksi di permukaan tanah

Dari perhitungan tersebut, akan diperoleh nilai  $K_h$  (Koefisien Horizontal) pada  $Y/H$  dengan periode ulang (T) yang diinginkan. Selanjutnya, berdasarkan hasil tersebut, Koefisien Vertikal ( $K_v$ ) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$K_v = 0,6 K_h \quad (7)$$

Dengan :

$K_v$  = Koefisien gempa vertikal

$K_h$  = Koefisien gempa horizontal

#### H. Pemeriksaan Stabilitas dan Faktor Keamanan Minimum

Menurut SNI 8064 2016, kondisi timbunan dengan pengawasan menggunakan data lab dan tanpa adanya pengawasan menggunakan instrumen, digunakan nilai FK:

1. Nilai  $FK > 1,3$  untuk kondisi tanpa beban gempa.
2. Nilai  $FK > 1,2$  untuk kondisi dengan beban gempa.

#### I. Analisis Stabilitas Lereng dan Deformasi Zona Inti Sandaran Kanan

Berikut adalah langkah-langkah analisis yang dilakukan:

1. Merencanakan rencana kemiringan penimbunan yang akan digunakan dalam analisis.
2. Analisis koefisien gempa dengan faktor koreksi kelas situs batuan.
3. Menentukan parameter material yang akan digunakan dalam pemodelan Geostudio.
4. Melakukan analisis deformasi menggunakan SIGMA/W dengan mempertimbangkan kondisi kadar air material. Analisis SIGMA/W juga akan menjadi *parent analysis* dari analisis stabilitas lereng.

5. Melakukan analisis stabilitas lereng menggunakan SLOPE/W dengan beban gempa dan tanpa beban gempa, dimana SLOPE/W memiliki *parent analysis* dari hasil analisis SIGMA/W, sehingga analisis juga telah mempertimbangkan adanya deformasi.

#### J. Tabulasi Variabel

| Simbol             | Keterangan  | Satuan                    |
|--------------------|---|---------------------------|
| $\phi', \emptyset$ | sudut geser   | ° atau rad                |
| $\alpha$           | koreksi pengaruh struktur   | -                         |
| $\alpha_2$         | nilai koefisien pengaruh struktur pada kondisi/tahap ke-2 (biasanya dari tabel atau grafik berdasarkan y/h) | -                         |
| $C$                | kohesi  | kPa atau t/m <sup>2</sup> |
| $E$                | young modulus   | kPa atau Pa               |
| $e$                | angka pori  | -                         |
| $EG$               | shear modulus   | kPa atau Pa               |
| $FPGA$             | faktor amplifikasi untuk PGA  | -                         |
| $g$                | nilai percepatan gravitasi  | m/s <sup>2</sup>          |
| $G_s$              | specific gravity  | -                         |
| $h_i$              | ketebalan lapisan tanah kurang dari 30 meter  | m                         |
| $k$                | permeabilitas   | cm/s atau m/s             |
| $K_h$              | koefisien gempa horizontal  | -                         |
| $K_o$              | koefisien gempa terkoreksi di permukaan tanah   | -                         |
| $K_s$              | koefisien gempa terkoreksi sesuai ketinggian titik tinjau   | -                         |
| $K_v$              | koefisien gempa vertikal  | -                         |
| $M_v$              | kompresibilitas   | m <sup>2</sup> /kN        |
| $N$ atau $N_{ch}$  | jumlah pukulan  | pukulan atau blows        |
| $PGA$              | percepatan gempa dasar  | m/s <sup>2</sup>          |
| $PGAM$             | percepatan gempa terkoreksi   | m/s <sup>2</sup>          |
| $SB$               | nilai percepatan gempa dasar dari Peta Gempa  | g (gravitasi)             |
| $S_u$              | kuat geser tak terdrainase  | kPa                       |
| $v_i$              | kecepatan gelombang geser dengan kondisi level shear strain 10 <sup>-5</sup> atau kurang                    | m/s                       |
| $V_s$              | kecepatan gelombang geser   | m/s                       |
| $\gamma_{dry}$     | kepadatan kering  | kN/m <sup>3</sup>         |
| $\gamma_{sat}$     | kepadatan jenuh   | kN/m <sup>3</sup>         |
| $\gamma_{sub}$     | kepadatan terendam  | kN/m <sup>3</sup>         |
| $\gamma_{wet}$     | kepadatan basah   | kN/m <sup>3</sup>         |
| $y/h$              | perbandingan antara tinggi bendungan dan ketinggian titik yang dianalisis                                   | -                         |

# KAJIAN KEAMANAN METODE PEKERJAAN TIMBUNAN ZONA INTI SANDARAN KANAN MAIN DAM BENDUNGAN CIJUREY

(Devina K. Widiastuti, Bagas Y. Pratama, Muhamad W. Zaky, dan Tria F. Jauhari)

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

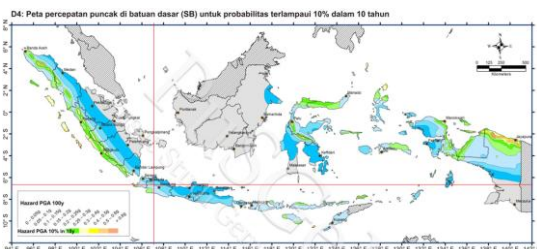
### A. Analisis Koefisien Gempa

Analisis koefisien gempa perlu dilakukan untuk mendapatkan koefisien gempa yang bisa didapat dari **Gambar 4** dan **Gambar 5** yang kemudian dikoreksi berdasarkan kelas situs batuan berdasarkan **Tabel 4** dan **Tabel 5**. Hasil koefisien gempa tersebut selanjutnya akan digunakan dalam analisis stabilitas lereng menggunakan SLOPE/W. Perhitungan dimulai dengan melihat **Tabel 3** untuk mengetahui kala ulang yang akan digunakan

**Tabel 3** Kriteria Perancangan Gempa Berdasarkan Peruntukan Infrastruktur

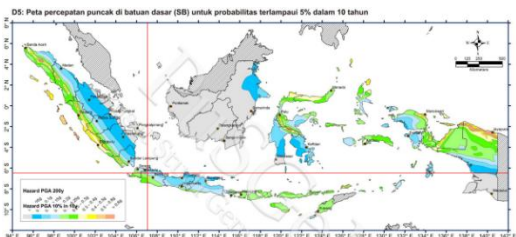
| Peruntukan | Umur rencana (tahun) | Prob. terlampau (%) | Periode ulang (tahun)                      | Kriteria keamanan   | Referensi          |
|------------|----------------------|---------------------|--|---|--------------------|
| Bendungan  | 100                  | 1                   | 10.000, Safety Evaluation Earthquake (SEE) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Tidak terjadi aliran air yang tidak terkendali</li> <li>Deformasi tidak melebihi 0,5 dan tinggi jagaan</li> <li>Deformasi pada filter tidak boleh melebihi 0,5 tebal filter</li> <li>Spillway tetap berfungsi setelah terjadi gempa rencana</li> </ul> | ICOLD No 148, 2016 |
|            | 100                  | 50                  | 145 Operating Basis Earthquake (OBE)       | Kerusakan minor setelah terjadi gempa rencana   |                    |

(Sumber: SNI 8460 2017)



**Gambar 4** Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar untuk Probabilitas Terlampaui 10% dalam 10 Tahun

(Sumber: Pusat Gempa Nasional)



**Gambar 5** Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar untuk Probabilitas Terlampaui 5% dalam 10 Tahun

(Sumber: Pusat Gempa Nasional)

Dari peta yang terdapat pada **Gambar 4** dan **Gambar 5** yang berasal dari (Pusat Studi Gempa Nasional, 2022) didapat:

- $PGA = 0,15$  (kala ulang 100 tahun)
- $PGA = 0,2$  (kala ulang 200 tahun)

- $PGA = 0,145$  (kala ulang 145 tahun dengan cara interpolasi)

**Tabel 4** Kriteria Kelas Situs Batuan

| Kelas Situs                                     | $V_s$ (m/detik) | N atau $N_{ch}$ | $S_u$ (kPa)   |
|---|-----------------|-----------------|---------------|
| SA (Batuan keras)                               | >1500           | N/A             | N/A           |
| SB (Batuan)                                     | 750 sampai 1500 | N/A             | N/A           |
| SC (Tanah keras, sangat padat dan batuan lunak) | 350 sampai 750  | >50             | $\geq 100$    |
| SD (Tanah sedang)                               | 175 sampai 350  | 15 sampai 50    | 50 sampai 100 |
| SE (Tanah lunak)                                | < 175           | <15             | < 50          |

Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut:

1. Indeks plastisitas,  $PI > 20$ ,
2. Kadar air,  $w \geq 40\%$ ,
3. Kuat geser niralir,  $S_u < 25$  kPa

SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)

(Sumber: SNI 1726 2019)

**Tabel 5** Matriks Kelas Situs

| Kelas Situs | PGA $\leq 1$      | PGA =1 | PGA =3 | PGA =4 | PGA =5 | PGA $\geq 6$ |
|-------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| SA          | 0,8               | 0,8    | 0,8    | 0,8    | 0,8    | 0,8          |
| SB          | 0,9               | 0,9    | 0,9    | 0,9    | 0,9    | 0,9          |
| SC          | 1,3               | 1,2    | 1,2    | 1,2    | 1,2    | 1,2          |
| SD          | 1,6               | 1,4    | 1,3    | 1,2    | 1,1    | 1,1          |
| SE          | 2,4               | 1,9    | 1,6    | 1,4    | 1,2    | 1,1          |
| SF          | SS <sup>(a)</sup> |        |        |        |        |              |

(Sumber: SNI 1726 2019)

Berdasarkan hasil uji MASW dan penentuan kelas situs batuan didapat nilai  $F_{PGA}$  berdasarkan PGA.

- $F_{PGA} = 1,2$
- $PGA_M = 0,5 \times 1,2 = 0,6$
- $K_H = 0,65/1 = 0,6$
- $K_V = 0,6 \times 0,81 = 0,0486$

Kemudian untuk analisis koefisien gempa dinamis dapat dihitung seperti contoh perhitungan di bawah ini:

a) Untuk  $0,4 < y/h \leq 1,0$

$K_s = y/h = 1:$





$$K_s = K_0 \times \{2,0 - 0,65 \times (y/h)\}$$

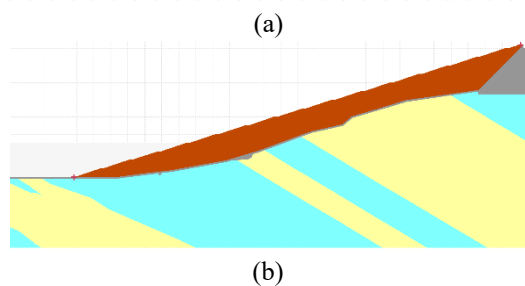
$$K_s = 0,1 \times \{2,0 - 0,65 \times 1\}$$

$$\begin{aligned}
 K_s \text{ atau } K_h &= 0,081 \\
 K_v &= 0,081 \times 0,6 \\
 K_v &= 0,0486 \\
 \mathbf{K_s = y/h = 0,75:} \\
 K_s &= K_o \times \{2,0 - 0,65 \times (y/h)\} \\
 K_s &= 0,1 \times \{2,0 - 0,65 \times 0,75\} \\
 K_s \text{ atau } K_h &= 0,151 \\
 K_v &= 0,151 \times 0,6 \\
 K_v &= 0,0907 \\
 \mathbf{K_s = y/h = 0,50:} \\
 K_s &= K_o \times \{2,0 - 0,65 \times (y/h)\} \\
 K_s &= 0,1 \times \{2,0 - 0,65 \times 0,5\} \\
 K_s \text{ atau } K_h &= 0,167 \\
 K_v &= 0,167 \times 0,6 \\
 K_v &= 0,1005 \\
 \mathbf{b) Untuk } 0,0 < y/h \leq 0,4 \\
 \mathbf{K_s = y/h = 0,25:} \\
 K_s &= K_o \times \{2,5 - 1,85 \times (y/h)\} \\
 K_s &= 0,1 \times \{2,5 - 1,85 \times 0,25\} \\
 K_s \text{ atau } K_h &= 0,203 \\
 K_v &= 0,203 \times 0,6 \\
 K_v &= 0,1222
 \end{aligned}$$

**1. Pemilihan Kemiringan Timbunan**

Dalam pemodelan menggunakan Geostudio diperlukan sebuah input berupa bentuk dari domain yang akan dianalisis dan parameter materialnya yang dapat dilihat pada **Gambar 6**.

| Color   | Name   | Slope Stability Material Model | Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> ) | Effective Cohesion (kPa) | Effective Friction Angle (°) |
|---|--------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------------------|
|  | 1-Inti | Mohr-Coulomb                   | 15.534                           | 11.8                     | 24.67                        |
|  | Caping | High Strength                  | 24                               |                          |                              |
|  | Tmbp   | Mohr-Coulomb                   | 18.07                            | 18.2                     | 32                           |
|  | Tmn    | Mohr-Coulomb                   | 17.93                            | 27                       | 29                           |

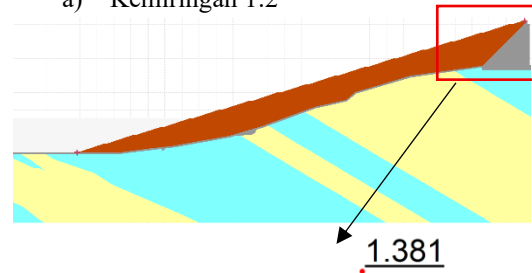


**Gambar 6** (a) Input Material Pemodelan (b) Potongan As Main Dam

Untuk memperoleh kemiringan lereng yang efektif namun tetap aman, dipilih dua alternatif kemiringan yaitu kemiringan 1:2 (**Gambar 7**) dan kemiringan 1:3 (**Gambar 8**) yang kemudian keduanya dikombinasikan dengan kemiringan 1:5. Kedua kombinasi tersebut kemudian dimodelkan untuk menganalisis keamanan

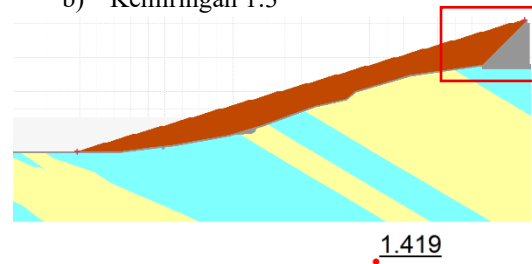
terhadap potensi longsor. Adapun dua kemiringan yang dipilih adalah:

a) Kemiringan 1:2



**Gambar 7** Nilai FK Kemiringan Lereng 1:2

b) Kemiringan 1:3



**Gambar 8** Nilai FK Kemiringan Lereng 1:3

Dari hasil pemodelan diatas, dipilih kemiringan 1:2 (**Gambar 7**) sebagai kombinasi kemiringan 1:5 karena lebih minim pengerjaan ulang dan sama amannya dengan kemiringan 1:3.

**B. Pemodelan Metode Pekerjaan Zona Inti Menggunakan GeoStudio SIGMA/W, SLOPE/W, dan SEEP/W**

Analisis stabilitas untuk metode pekerjaan zona inti pada sandaran kanan Bendungan Cijurey dilakukan dalam dua kondisi, yaitu tanpa gempa dan dengan gempa OBE. Evaluasi stabilitas lereng ini memakai pemodelan numerik melalui Geostudio 2023, dengan SIGMA/W sebagai analisis induk untuk SLOPE/W. Sebelum pemodelan numerik dijalankan, terlebih dahulu dihitung tekanan air pori pada timbunan dalam kondisi OMC 33%. Setelah itu, hasil analisis

## KAJIAN KEAMANAN METODE PEKERJAAN TIMBUNAN ZONA INTI SANDARAN KANAN MAIN DAM BENDUNGAN CIJUREY

(Devina K. Widiastuti, Bagas Y. Pratama, Muhamad W. Zaky , dan Tria F. Jauhari)

SIGMA/W digabungkan dengan SLOPE/W untuk memperoleh nilai faktor keamanan pada beberapa kondisi berbeda, untuk analisis SIGMA/W:

- a) *Staging analysis* mulai elevasi +215 hingga elevasi +260.
- b) *Staging analysis* pengupasan kembali timbunan dengan elevasi tertinggi +260 dengan konfigurasi gabungan kemiringan 1:5 dan 1:3.
- c) *Staging analysis* penggabungan pekerjaan zona inti antar paket hingga empat layer (satu layer setebal lima meter).
- d) *Staging analysis* mulai elevasi +215 hingga elevasi +293.
- e) *Staging analysis* pengupasan kembali timbunan dengan elevasi tertinggi +293 dengan konfigurasi gabungan kemiringan 1:5 dan 1:3.
- f) *Staging analysis* penggabungan pekerjaan zona inti antar paket hingga empat layer (satu layer setebal lima meter).

Untuk analisis SLOPE /W akan memiliki *parent analysis* SIGMA/W, sehingga analisis stabilitas lereng sudah dipengaruhi oleh deformasi yang terjadi.

- a) Stabilitas lereng kondisi timbunan dengan kemiringan 1:3 hingga elevasi +260 dengan beban gempa dan tanpa gempa (Case A).
- b) Stabilitas Lereng Kondisi Timbunan dengan Kemiringan 1:3 Hingga Elevasi +275 dengan Beban Gempa dan Tanpa Gempa (Case B).
- c) Stabilitas lereng kondisi timbunan dengan kemiringan 1:3 hingga elevasi +293 dengan beban gempa dan tanpa gempa (Case C).
  - a. Stabilitas Lereng Kondisi Timbunan Dengan Kemiringan Kombinasi 1:5+1:3 Hingga Elevasi +293 dengan Beban Gempa dan Tanpa Gempa (Case C1).
  - b. Stabilitas Lereng Kondisi Case B1 dengan Pekerjaan Timbunan Sambungan Satu Layer (Case C2).
- d) Stabilitas lereng kondisi timbunan dengan kemiringan 1:5+1:3 hingga

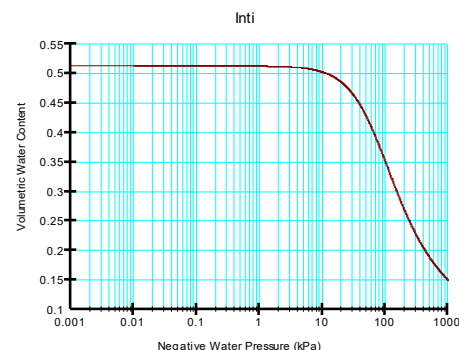
elevasi +260 dengan beban gempa dan tanpa gempa (Case D).

- e) Stabilitas lereng kondisi Case A dengan pekerjaan pengupasan kembali dua layer dari bawah (Case E).
  - a. Stabilitas lereng kondisi Case E dengan pekerjaan timbunan sambungan satu layer (Case E1).
  - b. Stabilitas lereng kondisi Case E dengan pekerjaan timbunan sambungan dua layer (Case E2).
- f) Stabilitas lereng kondisi Case A dengan pekerjaan pengupasan kembali empat layer dari bawah (Case F).
- g) Stabilitas lereng kondisi Case A dengan pekerjaan pengupasan kembali enam layer dari bawah (Case G).

Untuk batas keamanan stabilitas lereng yang digunakan adalah  $>1,2$  untuk kondisi gempa OBE dan  $>1,3$  untuk kondisi tanpa gempa.

### C. Analisis Tekanan Air Pori Kondisi OMC Timbunan Zona Inti

Kadar air volumetrik tidak dapat ditentukan secara langsung dalam pemodelan, namun nilai tekanan air pori awal dapat ditetapkan untuk setiap material melalui pengaturan material SEEP/W seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 9**. Dengan menentukan tekanan air pori target saat pengaktifan suatu lapisan timbunan, perangkat lunak akan merujuk pada kurva hubungan kadar air volumetrik terhadap hisapan matrik, sehingga material dapat pada kondisi kadar air (OMC) yang diinginkan. Pendekatan ini hanya berlaku untuk material *saturated/unsaturated*.



**Gambar 9** Tekanan Air Pori

Grafik diatas didapat dari analisis material SEEP/W dengan memasukkan beberapa

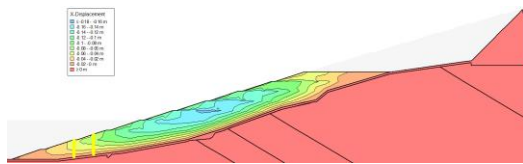
properties material zona inti yaitu *compressibility*, *saturated water content*, dan karakteristik material, sehingga dari grafik tersebut didapat nilai *water pressure* dalam kondisi OMC 33% yaitu sebesar -117,238 kPa. Nilai -117,238 kPa ini yang akan digunakan sepanjang analisis kedepannya.

**D. Analisis Deformasi SIGMA/W**

Untuk mengetahui berapa deformasi yang terjadi semasa pekerjaan timbunan, maka perlu dilakukan analisis numeris deformasi menggunakan SIGMA/W dengan berbagai kondisi dan beban alat berat.

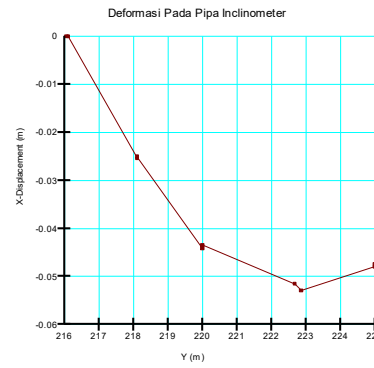
**a). Staging Analysis Mulai Elevasi +215 hingga Elevasi +260**

Pemodelan dilakukan dengan elevasi puncak pada elevasi +260 seperti pada **Gambar 10** dan pengecekan hasil deformasi pada pipa instrument yang dapat dilihat pada **Gambar 11**.

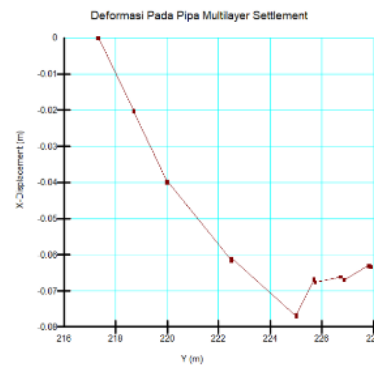


**Gambar 10** Hasil deformasi pekerjaan zona inti hingga elevasi +260 setelah dilakukan *staging analysis*

Hal ini dilakukan untuk mengetahui berapa batas kritis ketinggian penimbunan zona inti clay terhadap keamanan bahaya sliding dan besaran deformasi yang terjadi pada pipa instrument, sehingga dari hasil pemodelan dapat dipertimbangkan metode pelaksanaannya apakah masih memungkinkan menimbun lebih tinggi dan apakah diperlukan menunggu pekerjaan penimbunan dari sandaran kiri dapat dihubungkan dengan pekerjaan dari sandaran kanan.



(a)



(b)

**Gambar 11** Hasil deformasi ke arah X yang terjadi pada instrumen (a) (*Multilayer Settlement*) dan instrumen (b) (*Inclinometer*)

Grafik menunjukkan besarnya deformasi ke arah X terhadap elevasi pipa instrumen (lokasi instrumen dapat dilihat pada **Gambar 2**). Dari hasil pemodelan deformasi, didapat deformasi terbesar yang terjadi pada pipa instrumen (a) yaitu sebesar -0,077 m dan -0,052 m pada instrumen (b). Hasil deformasi selengkapnya dapat dilihat pada **Tabel 6**.

**Tabel 6** Hasil Analisis Deformasi Semua Mode

| Kode | Hasil Sigma/W   |        |
|------|-----------------|--------|
|      | Deformasi X (m) |        |
|      | (a)             | (b)    |
| a    | -0,077          | -0,052 |
| b    | -0,044          | -0,043 |
| c    | -0,036          | -0,040 |
| d    | -0,077          | -0,052 |
| e    | -0,045          | -0,044 |
| f    | -0,036          | -0,041 |

**2. Analisis Stabilitas Lereng Sliding SLOPE/W**

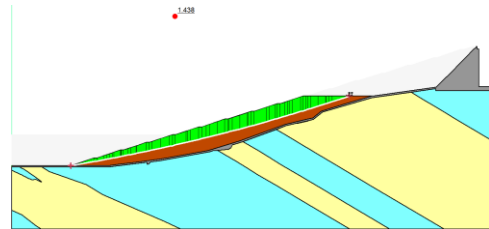
Untuk mengetahui berapa nilai FK pada pekerjaan timbunan maka dilakukan analisis numerik stabilitas lereng menggunakan

## KAJIAN KEAMANAN METODE PEKERJAAN TIMBUNAN ZONA INTI SANDARAN KANAN MAIN DAM BENDUNGAN CIJUREY

(Devina K. Widiastuti, Bagas Y. Pratama, Muhamad W. Zaky , dan Tria F. Jauhari)

SLOPE/W dengan berbagai kondisi dan beban alat berat.

### B. Stabilitas Lereng Kondisi Timbunan dengan Kemiringan 1:3 hingga Elevasi +260 dengan Beban Gempa dan Tanpa Gempa



Gambar 12 Case A untuk Y/H = 1 dengan Beban Gempa

Tabel 7 Rekap Nilai FK untuk Masing-masing Nilai Y/H Pada Masing-Masing Case

| Case A |              |             |
|--------|--------------|-------------|
| Y/H    | FS           |             |
|        | Dengan Gempa | Tanpa Gempa |
| 1      | 1.438        | 2.284       |
| 0.75   | 1.477        | 2.478       |
| 0.5    | 1.579        | 2.862       |
| 0.25   | 1.606        | 3.540       |

| Case B |              |             |
|--------|--------------|-------------|
| Y/H    | FS           |             |
|        | Dengan Gempa | Tanpa Gempa |
| 1      | 1.438        | 2.284       |
| 0.75   | 1.477        | 2.478       |
| 0.5    | 1.579        | 2.862       |
| 0.25   | 1.606        | 3.540       |

| Case C |                    |             |
|--------|--------------------|-------------|
| Y/H    | FS (Safety Factor) |             |
|        | Dengan Gempa       | Tanpa Gempa |
| 1      | 1.485              | 2.263       |
| 0.75   | 1.229              | 1.925       |
| 0.5    | 1.790              | 2.872       |
| 0.25   | 1.262              | 2.126       |

| Case C1 |              |             |
|---------|--------------|-------------|
| Y/H     | FS           |             |
|         | Dengan Gempa | Tanpa Gempa |
| 1       | 2.007        | 3.328       |
| 0.75    | 1.657        | 2.693       |
| 0.5     | 2.016        | 3.296       |
| 0.25    | 1.635        | 3.540       |

| Case C2 |              |             |
|---------|--------------|-------------|
| Y/H     | Y/H          |             |
|         | Dengan Gempa | Tanpa Gempa |
| 1       | 1.622        | 2.555       |
| 0.75    | 1.898        | 3.066       |
| 0.5     | 1.568        | 2.587       |
| 0.25    | 1.398        | 2.403       |

| Case D |              |             |
|--------|--------------|-------------|
| Y/H    | Y/H          |             |
|        | Dengan Gempa | Tanpa Gempa |
| 1      | 1.821        | 2.870       |
| 0.75   | 1.892        | 3.108       |
| 0.5    | 1.624        | 2.745       |
| 0.25   | 1.690        | 3.063       |

| Case E |              |             |
|--------|--------------|-------------|
| Y/H    | Y/H          |             |
|        | Dengan Gempa | Tanpa Gempa |
| 1      | 1.452        | 2.278       |
| 0.75   | 1.440        | 2.403       |
| 0.5    | 1.578        | 2.863       |
| 0.25   | 1.635        | 3.540       |

| Case E1 |              |             |
|---------|--------------|-------------|
| Y/H     | Y/H          |             |
|         | Dengan Gempa | Tanpa Gempa |
| 1       | 1.716        | 3.864       |
| 0.75    | 1.618        | 2.971       |
| 0.5     | 1.512        | 2.559       |
| 0.25    | 1.387        | 2.186       |

| Case E2 |              |             |
|---------|--------------|-------------|
| Y/H     | Y/H          |             |
|         | Dengan Gempa | Tanpa Gempa |
| 1       | 1.466        | 2.346       |
| 0.75    | 1.644        | 2.714       |
| 0.5     | 1.774        | 3.193       |
| 0.25    | 1.989        | 4.268       |

| Case F |              |             |
|--------|--------------|-------------|
| Y/H    | Y/H          |             |
|        | Dengan Gempa | Tanpa Gempa |
| 1      | 1.485        | 2.301       |
| 0.75   | 1.433        | 2.321       |
| 0.5    | 1.494        | 2.636       |
| 0.25   | 1.635        | 3.540       |

| Case F |              |             |
|--------|--------------|-------------|
| Y/H    | Y/H          |             |
|        | Dengan Gempa | Tanpa Gempa |
| 1      | 1.599        | 2.461       |
| 0.75   | 1.577        | 2.467       |
| 0.5    | 1.367        | 2.250       |
| 0.25   | 1.591        | 3.231       |

(Sumber: Perhitungan)

Berdasarkan hasil pemodelan pada Gambar 12 dan Tabel 7, diketahui bahwa pekerjaan timbunan zona inti sandaran kanan yang dikerjakan dengan kemiringan 1:3 dan 1:2 sama memiliki nilai FK memenuhi syarat ( $>1,2$  untuk kondisi gempa dan  $>1.3$  untuk tanpa gempa) dengan sudah mempertimbangkan kondisi dengan beban gempa, tanpa gempa, tekanan air pori, dan beban alat berat.

### 3. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis numeris, pemodelan deformasi dengan GeoStudio SIGMA/W mengindikasikan bahwa pada desain awal kemiringan lereng 1:3, pipa instrumen berpotensi mengalami deformasi sampai  $-0,077$  m. Oleh karena itu, hasil ini perlu dijadikan acuan dalam penentuan metode pemasangan instrumen pada tubuh main dam agar risiko kerusakan selama penimbunan zona inti dapat ditekan. Sementara itu, analisis stabilitas menggunakan GeoStudio SLOPE/W menunjukkan bahwa penimbunan dengan kemiringan 1:3 dan 1:2 tetap aman terhadap pengaruh beban alat berat (misalnya excavator) dan tekanan air pori, baik pada kondisi gempa maupun tanpa gempa, sehingga pekerjaan dapat dilaksanakan secara aman dari elevasi dasar  $+215$  hingga elevasi puncak bendungan utama  $+293$ . Namun, untuk meningkatkan efektivitas pelaksanaan di sandaran kanan sekaligus mengurangi potensi sliding dan deformasi, metode yang direkomendasikan adalah kombinasi kemiringan 1:5 dan 1:2, karena konfigurasi ini menghasilkan deformasi yang lebih kecil pada SIGMA/W serta tetap memenuhi kriteria stabilitas pada SLOPE/W dalam kondisi gempa maupun tanpa gempa, sehingga dinilai paling optimal dan mendukung pekerjaan penghubung antar paket berjalan aman.

### 4. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Konsultan Supervisi Proyek Pembangunan Bendungan Cijurey atas dukungan dan pemberian akses data yang digunakan dalam studi ini.

### 5. DAFTAR PUSTAKA

Affandi, D. (2014). Kriteria Material Konstruksi Untuk Bendungan Urugan (Studi Kasus Bendungan Sindangheula). *Jurnal Teknik Hidraulik*, 5(2), 165–180.

Ardiansyah, R. H., & Khurtumi, N. D. (2022). Perilaku Tekanan Air Pori Pada Bendungan Bajulmati Mulai Pengisian Hingga Tahun 2020. 9(2).

Bridle, R. (n.d.). *ICOLD Bulletin 164 on Internal Erosion - How to Estimate the Loads Causing Internal Erosion Failures in Earth Dams And Levees*.

Hakim, A. M., Satria, T. W., & Sahadewa, A. (2025). Studi Parametrik Analisis Kestabilan Lereng Dengan Soil Nailing Pada Sungai Ciliwung Area Bangunan Komplek Kopassus. *Axial: Jurnal*

*Rekayasa Dan Manajemen Konstruksi*, 6317(c), 290–296.

<https://doi.org/10.30742/axial.v13i3.5007>

Hura, J. K., & Gulo, M. (2024). Analisis Permeabilitas Tanah Berpasir Dan Tanah Lempung Dalam Hubungannya Dengan Manajemen Irigasi. *Jurnal Ilmu Pertanian Dan Perikanan*, 1(2), 60–67.

<https://doi.org/10.70134/penarik.v1i1.63>

Kementerian PUPR. (2017). *Modul 15 Instrumentasi Bendungan Urugan*. 69.

Lingkungan, J., & Bencana, D. A. N. (2019). *Analisis Kecepatan Gelombang Geser (Vs) Sebagai Upaya Mitigasi Bencana Gempabumi di Kulonprogo, Daerah Istimewa Yogyakarta*. 41–50.

Mutiara Jannah, D. (2024). Analisis Indeks Kerentanan Seismik Berdasarkan Nilai Vs30 Pada Zona Terdampak Gempa Bumi (Studi Kasus: Gempa Cianjur 21 November 2022). *Kurvatek*, 9(2), 107–116.

<https://doi.org/10.33579/krvtk.v9i2.4972>

Pusat Studi Gempa Nasional. (2022). *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2022*.

Sabrina, N., Wahyudi, H., Pratama, B. Y., Rekayasa, T., Bangunan, K., & Vokasi, F. (2025). *Simulasi Pemanfaatan Air Bendungan Cijurey Kabupaten. Axial: Jurnal Rekayasa Dan Manajemen Konstruksi*, 13(3), 267–276.

Sarah, D., Imron, A., Hardiyati, S., & Sadono, K. W. (2017). Analisa Geoteknik Bendungan Gongseng Terhadap Keamanan Rembesan, Stabilitas Lereng, Dan Beban Gempa. *Jurnal Karya Teknik Sipil; Volume 6, Nomor 2, Tahun 2017*.

Susilanto, P., & Ngadmanto, D. (2015). Analisis Kecepatan Gelombang Geser (Vs) Di Cilacap, Jawa Tengah Sebagai Upaya Mitigasi Bencana Gempabumi. In *Jurnal Meteorologi dan Geofisika* (Vol. 16, Issue 1). <https://doi.org/10.31172/jmg.v16i1.263>

Sosrodarsono, S., & Takeda, K. (2016). *Bendungan Tipe Urugan* (Cet. 6). Jakarta: Balai Pustaka.

Tafsir, M., & Siswoyo, S. (2024). Perencanaan Dinding Penahan Tanah Pada Lereng Aliran Lahar Dingin Gunung Semeru Di Km + (113° 01' 3264'') S/D Km + (113° 01' 1544'') Lumajang. *Axial: Jurnal Rekayasa Dan Manajemen Konstruksi*, 12(2), 071.

<https://doi.org/10.30742/axial.v12i2.3648>