Jurnal Teknik Indonesia

Volume 5 Nomor 3 Agustus 2026

https://jti.publicascientificsolution.com/index.php/rp

Stabilitas Bendungan Tiga Dihaji (Tipe Zona) Berdasarkan Nilai Sudut Geser (φ) dan Kohesi (c) Hasil Uji Geser Langsung Skala Penuh (1:1) di Lapangan

Heru Utomo*, Agus Sulaeman, Chandra Afriade Siregar
Universitas Sanggabuana YPKP Bandung, Indonesia
Email: heruutomocpgrd9@ymail.com*, agussulaeman2150462@gmail.com, chandra.afriade@usbypkp.ac.id

Keywords:

Zone-type embankment; Random Material; Shear Strength; Shear Angle; Cohesion; Stability.

Abstract

The Tiga Dihaji Dam is a zone embankment type consisting of a main dam and a cofferdam that form a single dam, composed of a vertical clay core, filter, transition, and rock fill. The required dam stability parameters are shear strength expressed by the internal friction angle (φ) and cohesion (c) obtained from triaxial tests or direct shear tests. Random materials with varying compositions cause the results of small-scale direct shear tests in the laboratory to not reflect the actual shear strength, because large particles cannot be included in the test. This study was conducted to overcome this limitation by using a full-scale direct shear test (1:1) in the field that is able to accommodate large particles. From the results of the large-scale direct shear test, the friction angle (φ) value was obtained at 41.8° and the cohesion value (c) was zero. The value of the Safety Factor Without Earthquake (Static Analysis) from various conditions met the required criteria (FK > 1.5), so that no geometric changes were required. Followed by a dynamic stability analysis using the modified earthquake coefficient method/OBE 145 years. Safety Factor Value (Dynamic Stability Analysis with Modified Earthquake Coefficient Method) OBE 145 years (FK > 1.2) so that no geometry changes are needed. Continued with dynamic stability analysis with Modified Earthquake Coefficient Method/MDE 10,000 years. The Safety Factor Value of MDE 10,000 years is only in after construction conditions that meet the requirements, while in Normal Water Level, Rapid Draw Down, and High Water Level conditions the Safety Factor value does not meet the requirements (FK < 1), so it is continued with a permanent transfer analysis using the Makdisi-Seed method (Transfer < 0.5 guard height).

Kata kunci:

Urugan tipe Zona; Material Acak; Kuat Geser; Sudut Geser; Kohesi; Stabilitas.

Abstrak

Bendungan Tiga Dihaji merupakan tipe urugan zona yang terdiri dari bendungan utama dan koferdam yang menjadi satu kesatuan bendungan, tersusun atas inti lempung vertikal, filter, transisi, dan urugan batu. Parameter stabilitas bendungan yang dibutuhkan adalah kuat geser yang dinyatakan dengan sudut geser dalam (φ) dan kohesi (c) yang diperoleh dari uji triaxial atau uji geser langsung. Material acak dengan penyusun yang bervariasi menyebabkan hasil uji geser langsung skala kecil di laboratorium tidak mencerminkan kuat geser sebenarnya, karena butir berukuran besar tidak dapat disertakan dalam pengujian. Penelitian ini dilakukan untuk mengatasi keterbatasan tersebut dengan menggunakan uji geser langsung skala penuh (1:1) di lapangan yang mampu mengakomodasi partikel berukuran besar.

	Dari hasil pengujian geser langsung ukuran skala besar didapatkan nilai sudut geser (φ) sebesar 41,8° dan nilai kohesi (c) nol. Nilai Faktor Keamanan Tanpa Gempa (Analisis Statis) dari berbagai kondisi memenuhi kriteria yang dipersyaratkan (FK > 1,5), sehingga tidak perlu perubahan geometri. Dilanjutkan dengan analisis stabilitas dinamik dengan metode koefisien gempa termodifikasi/OBE 145 tahun. Nilai Faktor Keamanan (Analisis Stabilitas Dinamik dengan metode koefisien gempa termodifikasi) OBE 145 tahun (FK > 1,2) sehingga tidak perlu perubahan geometri. Dilanjutkan dengan analisis stabilitas dinamik dengan metode koefisien gempa termodifikasi/MDE 10.000 tahun. Nilai Faktor Keamanan MDE 10.000 tahun hanya pada kondisi after construction yang memenuhi persyaratan, sedangkan pada kondisi Muka Air Normal (Normal Water Level), Surut Cepat (Rapid Draw Down), dan Muka Air Banjir (High Water Level) nilai Faktor Keamanan tidak memenuhi persyaratan (FK < 1), sehingga dilanjutkan dengan analisis alihan tetap dengan cara Makdisi-Seed (Alihan < 0,5 tinggi jagaan).

PENDAHULUAN

Bendungan Tiga Dihaji merupakan bendungan tipe urugan zona yang terdiri dari bendungan utama dan koferdam yang menyatu menjadi satu kesatuan bendungan, tersusun atas inti lempung vertikal, filter, transisi, dan urugan batu. Kemiringan lereng di bagian hulu adalah 1 : 2,5, sedangkan kemiringan lereng di bagian hilir adalah 1 : 2. Parameter yang dibutuhkan untuk analisis stabilitas bendungan antara lain kekuatan geser, yang biasanya dinyatakan dengan sudut geser dalam (φ) dan kohesi (c), yang diperoleh melalui uji triaxial atau uji geser langsung.

Berdasarkan review hasil uji laboratorium mekanika tanah terhadap contoh tanah yang diambil dari beberapa calon borrow pit, sebagian besar bahan timbunan inti kedap air yang telah diuji dapat digunakan sebagai bahan timbunan inti kedap air, sementara sebagian lainnya tidak dapat digunakan karena gradasi yang terlalu halus atau terlalu kasar, batas cair yang terlalu tinggi, indeks plastisitas yang terlalu besar, atau nilai permeabilitas yang kurang dari 10^{-6} cm/detik (Abbas et al., 2017; Demidrogen & Yildirim, 2024; Nasional, 2015, 2016, 2019). Oleh karena itu, penyedia jasa diwajibkan melakukan penyelidikan tanah secara detail pada lokasi borrow area yang ditunjuk agar material yang tidak memenuhi syarat tidak terbawa ke lokasi penimbunan inti kedap air (Luna et al., 2020; Material, 2023; Officials, 2022; Salmasi & Abraham, 2022).

Sebagai acuan penyelidikan tanah, jenis tanah yang mengandung butiran halus yang lolos saringan No. 200 (Φ < 0,0074 mm) antara 40% sampai 80% dapat digunakan sebagai bahan timbunan inti kedap air bendungan Tiga Dihaji. Tanah yang layak digunakan harus memiliki batas cair antara 44% sampai 80% dan indeks plastisitas antara 15% sampai 50%, serta terletak di atas garis A ("A" line) pada grafik Casagrande, sedangkan untuk bahan timbunan contact clay dapat dipilih tanah dengan batas cair kurang dari 100%. Hasil uji pemadatan bahan timbunan inti kedap air harus menghasilkan berat volume kering maksimum lebih dari 1,225 kg/cm³, dengan nilai permeabilitas berkisar antara 1 x 10^{-6} cm/detik sampai 1 x 10^{-8} cm/detik. Adapun nilai parameter kuat geser yang disyaratkan adalah sudut gesek dalam (Φ) lebih besar dari 15°, dan nilai kohesi lebih besar dari 40 kPa, dengan nilai tengah dari seluruh hasil uji UU untuk analisis stabilitas bendungan diperoleh sudut gesek dalam sebesar 19,12° dan nilai kohesi sebesar 67,50 kPa.

Pada bendungan tipe urugan, filter digolongkan ke dalam dua kriteria, yaitu critical filter dan non-critical filter. Critical filter adalah jenis filter yang apabila gagal menjalankan fungsinya dapat mengakibatkan kerusakan bahkan keruntuhan bendungan, seperti downstream filter, sedangkan non-critical filter adalah jenis filter yang kegagalannya tidak berakibat fatal,

seperti upstream filter (Boudia et al., 2021; Ferreira et al., 2022; Fu et al., 2020; Hakim et al., 2023; Haselsteiner et al., 2017; Institution, 2022). Secara umum, filter pada bendungan tipe urugan harus bersifat permeable agar seepage dapat mengalir di dalamnya, namun tetap mampu menahan butiran tanah yang tererosi apabila terjadi proses piping pada inti kedap air. Oleh karena itu, gradasi filter merupakan fungsi dari base material yang dilindunginya, dengan bahan filter umumnya berupa free draining material mulai dari pasir hingga gravel yang disusun sedemikian rupa sehingga dapat menahan butiran tanah namun tetap meloloskan air dengan baik, yang dikenal sebagai "no erosion filter". Filter untuk bendungan Tiga Dihaji akan diambil dari sungai Selabung di bagian hilir lokasi bendungan dengan jarak hingga 10 kilometer (Lade, 2016; Ma & Chi, 2016; Sahadewa, 2023; Sahadewa et al., 2022).

Desain filter pada bagian hilir inti kedap air yang dikategorikan sebagai critical filter dilaksanakan dalam dua lapis dengan gradasi berbeda, yaitu filter kasar dan filter halus, agar filter dapat berfungsi maksimal ketika terjadi proses piping di dalam inti kedap air dengan menangkap butiran tanah yang terbawa seepage, sementara air tetap dapat melewati filter agar tidak terjadi kenaikan tegangan air pori. Karena bendungan Tiga Dihaji dilengkapi dengan bottom outlet, filter dibuat sama pada sisi hulu dan hilir inti kedap air, mengingat pada saat bottom outlet dioperasikan akan terjadi tegangan air pori dari inti ke arah waduk sehingga filter diperlukan untuk mencegah terjadinya longsor. Desain filter ini didasarkan pada gradasi inti kedap air yang memiliki butiran lolos saringan No. 200 pada kisaran 40% sampai 80%, dengan gradasi filter halus berupa fraksi pasir dan gradasi filter kasar berupa fraksi pasir dan kerikil. Pasir dan kerikil dari sumber alami di sungai Selabung harus mengikuti gradasi filter halus dan kasar tersebut apabila akan digunakan, sehingga diperlukan fasilitas pencucian dan penyaringan, dan apabila sumber alam tidak mencukupi, filter halus dan kasar dapat diproduksi melalui proses pemecahan (crushing) dari bahan batuan yang telah lolos uji laboratorium.

Bahan timbunan rockfill adalah bahan bendungan tipe urugan yang terdiri dari timbunan batuan hasil peledakan dengan gradasi butiran tertentu untuk menjaga stabilitas bendungan, sedangkan zona transisi merupakan bagian dari timbunan rockfill dengan gradasi lebih kecil yang berfungsi sebagai transisi antara timbunan rockfill dan filter, agar proses load transfer antarzona tidak menimbulkan perbedaan penurunan yang besar maupun hambatan tegangan akibat perbedaan modulus elastisitas antara zona filter dan rockfill. Urugan rockfill memiliki peran penting dalam menjaga stabilitas bendungan pada berbagai kondisi, baik pada saat pelaksanaan dan setelah penimbunan selesai sebelum penggenangan waduk, pada saat operasional, pada saat terjadi penurunan muka air secara cepat (rapid drawdown), maupun pada saat terjadi gempa. Mengingat pentingnya fungsi tersebut, pemilihan bahan timbunan rockfill perlu memenuhi beberapa persyaratan mutlak, yaitu memiliki berat jenis yang cukup, daya tahan (durability) yang tinggi, serta tidak mudah pecah akibat gaya pemadatan dan pengaruh cuaca, yang seluruhnya diverifikasi melalui uji laboratorium.

Hasil uji kuat tekan bebas dari quarry Perean menunjukkan nilai kuat tekan batuan berkisar antara 419 kg/cm² sampai 550 kg/cm², yang seluruhnya berada di atas ambang 400 kg/cm² sehingga layak digunakan sebagai bahan timbunan rockfill. Hasil uji dari tujuh sampel batuan menunjukkan sudut gesek dalam berkisar antara 33° sampai 59°, dengan nilai kohesi antara 39 kg/cm² sampai 59 kg/cm². Hasil uji abrasi 500 putaran menunjukkan fraksi hancur sebesar 32,80% untuk batuan jenis breksi dan 29,40% untuk batuan jenis tufa, keduanya berada di bawah batas 40% sehingga dapat digunakan sebagai bahan timbunan rockfill. Sementara itu, uji soundness pada batuan jenis tufa menunjukkan pengurangan berat material setelah lima putaran sebesar 17,06%, sedikit lebih tinggi dari batas yang diizinkan yaitu 10%. Namun karena parameter teknis lainnya memenuhi persyaratan, batuan dari quarry Perean tetap dapat digunakan sebagai bahan timbunan rockfill pada bendungan Tiga Dihaji.

Zona rock riprap merupakan lapisan terluar pada lereng hilir maupun lereng hulu bendungan tipe urugan, berupa batuan dengan diameter lebih besar dari gradasi rockfill dan

hampir seragam yang dipasang secara khusus pada permukaan timbunan rockfill. Fungsi utama rip-rap, dengan diameter batuan yang besar dan kualitas terpilih dari formasi fresh rock, adalah melindungi timbunan rockfill dari pengaruh cuaca terutama pada lereng hilir, serta dari cuaca dan gerusan ombak air waduk pada lereng hulu, agar timbunan rockfill dapat bertahan sesuai umur rencana bendungan, dengan pemasangan dilakukan menggunakan excavator. Untuk mengurangi kerusakan lingkungan, bahan timbunan rockfill, zona transisi, dan rock riprap sebaiknya dipenuhi dari quarry yang memiliki jenis batuan yang sama.

Material acak biasanya dikumpulkan dari hasil galian pondasi bendungan atau dari sumber galian di lokasi lain. Besar kecilnya zona material acak menjadi faktor penting dalam meminimalkan biaya konstruksi, dan pemilihan sumber material acak umumnya tidak terlalu ketat serta mudah diperoleh sehingga dapat mengurangi kerusakan lingkungan. Meski demikian, penggunaan material acak juga membawa tantangan tersendiri dalam konstruksi bendungan, karena material ini memiliki penyusun yang sangat bervariasi, mulai dari tanah kohesif yang sangat halus hingga bongkahan batu dengan berbagai tingkat pelapukan.

Variasi penyusun material acak, mulai dari tanah kohesif yang sangat halus hingga bongkahan batu dengan berbagai tingkat pelapukan, menyebabkan penentuan kuat geser menggunakan uji geser langsung berskala kecil di laboratorium tidak dapat mencerminkan kuat geser sebenarnya dari material tersebut. Hal ini disebabkan butir berukuran besar dalam material acak tidak dapat disertakan dalam pengujian kuat geser langsung dengan alat tersebut, sehingga hasil evaluasi kuat geser material acak menjadi tidak tepat jika hanya menggunakan alat tersebut. Ketidakstabilan lereng dapat muncul pada zona material acak di bendungan, sebagaimana pernah terjadi pada salah satu proyek strategis nasional pembangunan bendungan, di mana bagian hilir bendungan mengalami keruntuhan lereng akibat kegagalan zona timbunan material acak. Sejak peristiwa kelongsoran tersebut, evaluasi material acak pada konstruksi bendungan di Indonesia menjadi lebih ketat, sehingga kuat geser material acak perlu diuji menggunakan metode yang representatif dan mampu mengakomodasi partikel berukuran besar.

Uji geser langsung skala penuh (1 : 1) di lapangan memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan uji geser langsung berskala kecil di laboratorium, karena pengujian ini mampu menyertakan butiran berukuran besar, mempertimbangkan kinerja pemadatan di lapangan, serta dapat memverifikasi kuat geser material acak berupa nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (φ) yang sesungguhnya terpasang di lapangan.

Penelitian ini dimaksudkan untuk memperoleh hasil uji geser langsung skala penuh terhadap zona rockfill/material acak berupa nilai sudut geser dalam (φ) dan kohesi (c) yang terpasang di lapangan.

Penelitian sebelumnya oleh Sahadewa (2025) mengkaji pengembangan uji geser langsung skala besar untuk material acak bendungan di Indonesia dan memperkenalkan fasilitas uji lapangan bernama ILSDS (In-situ Large Scale Direct Shear) yang dikembangkan oleh Indonesian Geotechnical Institute bekerja sama dengan Institut Teknologi Bandung dan Universiti Teknologi Malaysia. Hasil uji pada material acak di Bendungan Rukoh, Aceh, menunjukkan variabilitas kuat geser serta perilaku unik dalam hubungan tegangan-regangan yang terkait dengan kandungan material acak itu sendiri, baik yang kaya butiran besar maupun butiran halus. Penelitian tersebut merekomendasikan uji skala besar sebagai praktik rutin dalam konstruksi bendungan.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai sudut geser dalam (φ) dan kohesi (c) terhadap material acak yang dipersyaratkan dalam desain perencanaan. Sudut geser dalam (φ) yang dipersyaratkan untuk stabilitas dengan geometri bendungan Tiga Dihaji berkisar antara 33° sampai 59°, dengan nilai kohesi (c) sebesar 0. Nilai sudut geser dalam (φ) dan kohesi (c) yang diperoleh dari hasil pengujian geser langsung skala penuh dibutuhkan untuk analisis stabilitas bendungan, sehingga hasil analisis yang dilakukan menjadi lebih akurat.

Fasilitas pengujian geser langsung skala penuh di lapangan (Insitu Full Scale Direct Shear Test) di Indonesia saat ini masih tergolong terbatas, dengan hanya tiga lokasi yang tersebar di Pulau Jawa, yaitu Bandung, Surakarta, dan Malang. Ketiga fasilitas tersebut dimiliki oleh Balai Hidrolika dan Geoteknik Keairan (BHGK) Bandung, PT. Indra Karya (Persero) Malang, dan Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Bengawan Solo, di mana BHGK dan BBWS Bengawan Solo dimiliki oleh Kementerian Pekerjaan Umum. Fasilitas milik BHGK dan PT. Indra Karya sangat sesuai digunakan sebagai laboratorium lapangan proyek karena mudah dipindahkan, sedangkan fasilitas milik BBWS Bengawan Solo terletak permanen di laboratorium mekanika tanah. Fasilitas milik PT. Indra Karya (Persero) dan BBWS Bengawan Solo juga menawarkan pengujian dalam kondisi jenuh terendam maupun tidak jenuh, sementara fasilitas milik BHGK hanya dapat melakukan pengujian dalam keadaan tidak jenuh. Setelah mempertimbangkan ketiga fasilitas tersebut, peralatan yang dipilih untuk penelitian ini adalah peralatan uji milik PT. Indra Karya (Persero), yang akan dimobilisasi ke lokasi proyek bendungan Tiga Dihaji. Lokasi penelitian di bendungan Tiga Dihaji terdiri dari 3 lokasi, dengan masing-masing lokasi terdiri dari 3 titik, sehingga total jumlah titik lokasi penelitian adalah 9 titik.

METODE PENELITIAN

Tahapan Pengujian Geser Langsung Skala Besar.

Pada uji geser langsung skala besar (ILSDS), setidaknya 3 sampel disiapkan dengan cara menggali dan memahat timbunan yang telah dipadatkan.



Gambar 1. Penggalian Lubang Uji

Box geser dipasang pada setiap sampel.



Gambar 2. Box Geser

Excavator digunakan sebagai alat bantu instalasi balok reaksi vertikal dan pelat baja tanam.



Gambar 3. Instalasi balok reaksi vertikal dan pelat baja tanam

Sensor pergerakan dan sistem hidraulis diperiksa sebelum pengujian.



Gambar 4. Pemeriksaaan sensor pergerakan dan sistem hidraulis

Beban horizontal dan vertikal diterapkan secara manual menggunakan sepasang pompa hidraulis. Sampel pertama dibebani dengan tegangan normal menggunakan batang hidraulis vertikal. Tegangan normal ini dijaga konstan sepanjang durasi pengujian. Beban horizontal secara meningkat diterapkan pada sampel ini hingga terjadi keruntuhan. Penambahan beban horizontal dilakukan dengan menjaga laju tegangan geser (i.e stress-controlled test). Sampel lainnya diuji dengan cara yang sama pada tegangan vertikal normal yang lebih besar. Persiapan sampel uji geser langsung skala ukuran besar dilapangan memerlukan waktu lama, menghabiskan biaya tinggi, serta membutuhkan bantuan tenaga kerja banyak dan alat berat.

Analisa Stabilitas Bendungan.

Tabel 1. Kelas Resiko Bendungan dan Bangunan Air.

Faktor risiko total	Kelas Risiko
(0 - 6)	I (Rendah)
(7 - 8)	II (Moderat)
(19 - 30)	III (Tinggi)
(31 - 36)	IV (Ekstrem)

Kriteria beban gempa ditinjau berdasarkan tabel kriteria beban gempa untuk desain bendungan dan ditentukan menurut kelas resiko.

Analisis dilakukan dengan dua tingkat gempa, yaitu sebagai berikut :

1. Persyaratan tanpa kerusakan dengan periode ulang T ditentukan (OBE), sehingga beban gempa dapat diperoleh dari peta zona gempa. Analisis dilakukan dengan cara koefisien gempa. Kestabilan bendungan harus lebih tinggi dari factor keamanan minimum yang

dipersyaratkan, bendungan tidak mengalami kerusakan yang serius, dan masih tetap beroperasi, serta tidak diperlukan pekerjaan pemeriksaaan dan perbaikan yang menyeluruh.

2. Persyaratan yang diperkenankan ada kerusakan tanpa terjadi keruntuhan dengan periode ulang T ditentukan untuk kelas I, II, III, dan IV sehingga percepatan gempa maksimum di permukaan tanah dapat diperoleh dari peta zona gempa.

Analisis dilakukan dengan cara dinamik dengan menggunakan ragam sambutan gempa atau sejarah waktu percepatan gempa.

Bendungan harus mampu menahan desain MDE tanpa keruntuhan atau diperkenankan ada kerusakan.

Tabel 2. 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	100–200	Koef. Gempa	10.000 (MDE)	Koef. Gempa atau Dinamik
N = 50–100	ad ≥ 0,1 g			
III	50–100	Koef. Gempa	5.000 (MDE)	Koef. Gempa atau Dinamik
N = 50–100	ad ≥ 0,1 g			
II	50–100	Koef. Gempa	3.000 (MDE)	Koef. Gempa atau Dinamik
N = 50–100	ad ≥ 0,1 g			
I	50–100	Koef. Gempa	1.000 (MDE)	Koef. Gempa atau Dinamik
N = 50–100	ad ≥ 0,1 g			

Catatan:

a. Untuk hubungan besar ad dengan kondisi geologi setempat yang khusus, Peta Zona Gempa tidak dapat digunakan, dan perlu dilakukan studi gempa tersendiri.
b. Analisis Dinamik dapat dilakukan dengan analisis ragam sambutan gempa atau sejarah waktu percepatan gempa.

Tabel 3. Kriteria Faktor untuk Evaluasi Keamanan Bendungan

Faktor Risiko	**Ekstrim**	**Tinggi**	**Moderat**	**Rendah**
Kapasitas (10^6 m^3)	> 10	10.00 – 1.25	1.00 – 1.25	< 0.125
(FR_k)	6	4	2	0
Tinggi Bendungan (m)	> 45.00	45.00 – 30.00	30.00 – 15.00	< 15
(FR_t)	6	4	2	0
Kebutuhan Evakuasi (orang)	> 1.000	1.000 – 100	100 – 1	0
(FR_o)	12	8	4	0
Tingkat Kerusakan di Hilir	Sangat Tinggi	Tinggi	Agak Tinggi	Tidak ada
(FR_h)	12	10	8	4

Pada persyaratan yang diperkenankan ada kerusakan tanpa keruntuhan untuk kelas resiko I, II, III, IV untuk H > 15 meter dilakukan dengan proses yang tergantung pada ad yaitu:

1. Ad ≤ 0,25 g , analisis dilakukan dengan cara Eb,
2. Ad > 0,25 g , analisis dilakukan dengan cara Ec,

Prosedur Analisis yang dianjurkan untuk bendungan tipe urugan.

Tabel 4. Prosedur Analisis yang dianjurkan untuk bendungan tipe urugan

Kelas Risiko	Tinggi Bendungan H ≤ 15 m		Tinggi Bendungan H > 15 m	
	a_e < 0,25 g	a_e ≥ 0,25 g	a_e < 0,25 g	a_e ≥ 0,25 g
Persyaratan tanpa kerusakan (OBE)				
I	E_a	E_a	E_a	E_a
II	E_a	E_a	E_a	E_a
III	E_a	E_a	E_a	E_a
IV	Tidak ada	Tidak ada	E_a	E_a
Persyaratan yang diperkenankan ada kerusakan tanpa keruntuhan (MDE)				
I	E_a	–	E_a	E_a
II	E_a	–	E_a	E_a
III	E_a	–	E_a	E_a
IV	Tidak ada	–	E_a	E_a

Catatan
E_a = analisis menggunakan cara koefisien gempa.
E_b = analisis menggunakan cara koefisien gempa termodifikasi.
E_c = analisis dilakukan secara bertahap, dimulai dengan menggunakan analisis deformasi permanen termodifikasi. Jika faktor keamanan ≤ 1,00, perlu dilanjutkan dengan analisis deformasi permanen menggunakan cara Makdisi–Seed dengan syarat deformasi tidak melebihi 50% dari tinggi jagaan. Jika tidak memenuhi syarat, dilanjutkan dengan analisis respons dinamik menggunakan elemen hingga.

Dalam analisis ini besarnya koefisien gempa dimodifikasi dengan berpedoman pada Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Tipe urugan Akibat Gempa Bumi (Pd-T-14-2004-A). Distribusi koefisien gempa antara bagian bawah bendungan sampai dengan puncak bendungan berbeda-beda. Dalam hal ini puncak bendungan dinyatakan dengan H dengan pembagian 0,25 H, 0,50 H, 0,75 H, dan H (dimana H = tinggi bendungan). Koefisien Gempa k dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

1. Untuk $0 < y/H \leq 0.40$, $k = kh \times (2.50 - (1.85 \times y/H))$
2. Untuk $0.40 < y/H \leq 1.00$, $k = kh \times (2.00 - (0.60 \times y/H)$

Software yang Digunakan.

Analisa Stabilitas Lereng Statis,Analisis Dinamis dan Gempa pada penelitian ini menggunakan software Geostudio. Adapun software Geostudio yang digunakan dalam penelitian ini yaitu :

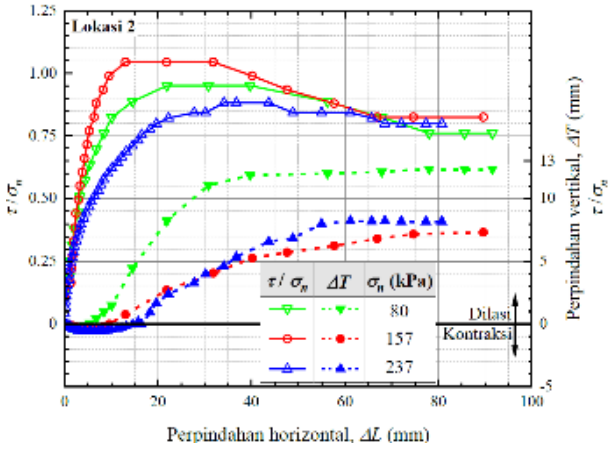
a. Slope/W : software untuk Analisa Stabilitas Lereng Statis.
b. Quake/W : Software untuk Analisa Dinamis dan Gempa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Geser Langsung Skala Penuh (1:1) di Lapangan.

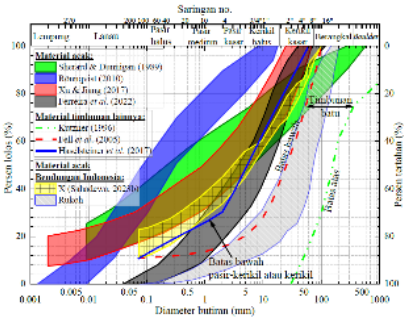
Serangkaian Uji Geser Langsung Skala Penuh (1:1) dilakukan untuk menilai kuat geser material acak di 3 lokasi bendungan Tigadihaji.Pelaksanaan pengujian dimasing-masing lokasi tersebut mengacu pada metode yang telah dijelaskan pada metode Uji Geser Langsung Skala Penuh (1:1) di Lapangan. Disetiap lokasi, 3 sampel disiapkan untuk pengujian.

Hasil pengujian di lokasi 2:



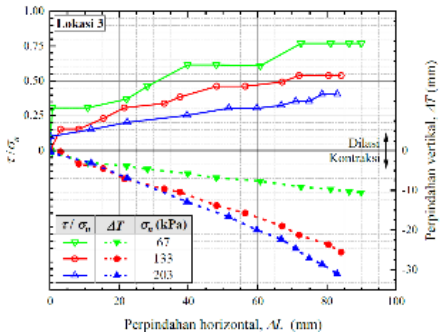
Gambar 5. Hubungan antara rasio tegangan, perpindahan horizontal dan vertikal di lokasi 2

Hubungan antara tegangan geser dan perpindahan vertikal terhadap perpindahan horizontal untuk tiga tegangan normal yang berbeda, menunjukkan bahwa kuat geser puncak meningkat seiring dengan tegangan normal. Hubungan antara perpindahan vertikal dan horizontal menunjukkan perilaku tekan dan kompresi sampel pada permulaan perpindahan horizontal di lokasi 2. Pada perpindahan horizontal yang lebih besar hingga keruntuhan, perilaku ekspansif atau dilasi terjadi di lokasi 2 ini.Perilaku serupa juga ditunjukkan oleh hasil pengujian di lokasi 1. Perilaku sampel di kedua ini sesuai dengan perilaku pasir padat, Material acak pada lokasi 1 dan 2 di dominasi batuan andesit yang diambil dari berbagai sumber diluar lokasi bendungan.



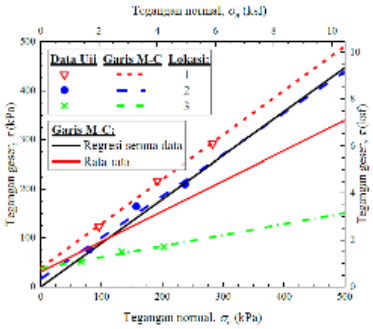
Gambar 6. Distribusi ukuran butiran untuk material timbunan bendungan

Hasil pengujian lokasi 3:



Gambar 7. Hubungan antara rasio tegangan, perpindahan horizontal dan vertikal di lokasi 3

Sampel di lokasi 3 mengalami perilaku kompresi pada seluruh rentang perpindahan horizontal di semua tegangan normal. Tanah berbutir dengan kepadatan relatif lepas atau tanah lempung terkonsolidasi normal (normally consolidated/NC) biasanya memiliki perilaku tegangan geser, perpindahan horizontal, dan perpindahan vertikal serupa dengan sampel lokasi 3. Sumber material acak di lokasi 3 adalah bekas buangan pekerjaan galian Bendungan Tigadihaji. Material acak ini berupa pasir dengan butiran halus lempung dan lanau. Dengan demikian, butiran pada lokasi 3 memiliki ukuran butiran yang jauh lebih kecil daripada material acak di lokasi 1 dan 2. Hubungan kuat geser, perpindahan horizontal, dan tegangan normal di ketiga lokasi digunakan untuk memperoleh variasi antara kuat geser puncak dan tegangan normal. Disetiap lokasi, variasi ini didekati dengan menggunakan garis linier Mohr-Coulomb (M-C). Garis ini dipakai untuk menentukan kuat geser tanah, seberapa besar beban geser yang dapat ditahan sebelum tanah mengalami kelongsoran.



Gambar 8. Hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser material acak di bendungan Tigadihaji

Parameter M-C (Mohr-Coulomb) dari 3 lokasi dirangkum dalam Tabel dibawah ini :

Tabel 5. Parameter M-C: Hasil Uji Geser Langsung Skala Penuh

Lokasi	c (kPa)	ϕ (°)	Keterangan
Lokasi 1	38,5	42,1	OK
Lokasi 2	18,1	40,2	OK
Lokasi 3	38,1	12,7	Not OK

Pada lokasi 3 nilai sudut geser (φ) tidak memenuhi persyaratan (330 s/d 590), sehingga pada lokasi 3 ini dilakukan pemadatan kembali, dilanjutkan dengan pengujian geser langsung skala penuh, dengan hasil sebagai berikut :

Tabel 6. Parameter M-C : Hasil Uji Geser Langsung Skala Penuh pada lokasi 3

Lokasi	c (kPa)	ϕ (°)
Lokasi 1	38,5	42,1
Lokasi 2	18,1	40,2
Lokasi 3	39,4	43,1

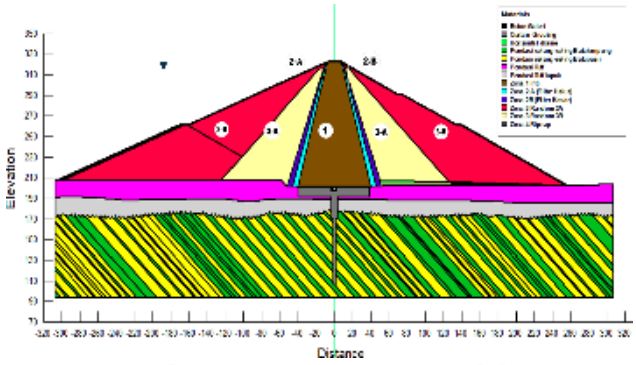
Nilai sudut geser dalam (φ) berkisar antara 40,2o sampai 43,1o dengan nilai rata-rata 41,8o dan simpangan baku16,4o. Regresi Linier pada data lapangan seluruh lokasi menghasilkan c sebesar 0 kPa.

Hasil pengujian geser langsung skala penuh menunjukkan adanya variabilitas kuat geser material acak pada bendungan Tigadihaji. Variabilitas ini berasal dari berbagai hal, salah satunya adalah keragaman konten material acak itu sendiri. Secara umum material acak dengan kandungan butiran halus yang tinggi cenderung memiliki c yang relatif tinggi. Sebaliknya, material acak dengan kandungan butiran yang lebih kasar/besar umumnya menghasilkan nilai

sudut geser dalam (φ) yang relatif tinggi dan nilai c yang rendah. Secara umum distribusi ukuran ukuran butiran pada material acak di bendungan Tigadihaji menunjukkan dominasi butiran besar dan cenderung tidak memiliki butiran halus, seperti lanau atau lempung. Lokasi 3 memiliki ukuran butir lebih kecil dari lokasi lainnya. Penyusun material acak dari 3 lokasi telah menunjukkan variabilitas kuat geser pada pengujian.

Analisa Stabilitas.

Geometri Permodelan.



Gambar 9. Geometri Permodelan

Elevasi Puncak Bendungan, Muka Air Banjir, Muka Air Normal, Tinggi Jagaan.

Elevasi Puncak Bendungan : + 323,674
Elevasi Muka air banjir : + 320,624
Elevasi Muka Air Normal : + 315,674
Tinggi Jagaan : 3,05

Parameter Analisis.

Tabel 7. Parameter Analisis

No	Kode	Material	γsat (g/cm³)	γdry (g/cm³)	c' (kg/cm²)	φ' (°)	e	E (kPa)	Gs (g/cm³)	K (Permeability) (cm/dt)
1	1	Inti	1,400	1,843	–	26,33	0,8586	12	2,552	$2{,}623 \times 10^{-7}$
2	2A	Filter halus	1,858	2,120	–	30	–	50	2,7	$1{,}106 \times 10^{-7}$
3	2B	Filter kasar	1,757	1,780	–	35	–	80	2,66	$1{,}00 \times 10^{-5}$
4	3A	**Random/acak**	2,100	1,989	–	**41,8**	–	200	2,702	1×10^{-3}
5	3B	**Random/acak**	1,989	2,010	–	**41,9**	–	200	2,61	1×10^{-3}
6	4	Rip rap	2,710	2,710	447	54	–	1320	–	1×10^{-3}
7	–	Beton	2,200	2,200	–	–	–	12300	–	$1{,}52 \times 10^{-7}$
8	–	Curtain Grouting	–	–	–	–	–	–	–	$1{,}62 \times 10^{-7}$
9	–	Pondasi Tuff	2,343	2,367	16,77	54,86	0,341	774	2,9833	$1{,}097 \times 10^{-7}$
10	–	Tuff Lunak	1,983	2,068	8,71	42,84	0,408	381	2,4883	$6{,}5 \times 10^{-7}$
11	–	Pondasi batu berpasir	1,975	2,109	25,24	56,09	0,327	1250	2,4721	$1{,}51 \times 10^{-5}$
12	–	Pondasi batu lempung	1,494	1,776	4,44	47,6	0,327	899	2,1132	$4{,}44 \times 10^{-5}$

SNI Faktor Keamanan Untuk Stabilitas Bendungan (SNI 8064 : 2016)

Keamanan lereng bendungan didapatkan dari hasil analisis stabilitas lereng bendungan berupa nilai faktor keamanan (FK), SNI M 8064:2016, Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Tipe urugan. Tabel berikut ini adalah kriteria nilai faktor keamanan untuk berbagai kondisi bendungan.

Tabel 8. Kriteria nilai faktor keamanan untuk berbagai kondisi bendungan (SNI 8064 : 2016)

No	Kondisi	Kuat Geser	Tekanan Air Pori	FK Tanpa Gempa	FK dengan Gempa*
1	**Selesai konstruksi tergantung:**1. Jadwal konstruksi.2. Hubungan antara tekanan air pori dan waktu.	**1. Efektif**	Peningkatan tekanan air pori pada urugan dan fondasi dihitung menggunakan data laboratorium dan pengawasan instrumen.	1,30	1,20
	Lereng US dan DS.		Idem hanya tanpa pengawasan instrumen.	1,40	1,20
	Dengan gempa tanpa kerusakan digunakan 50% koefisien gempa desain.		Hanya pada urugan tanpa data laboratorium dan pengawasan instrumen.	1,30	1,20
		2. Total	Tanpa pengawasan instrumen.	1,30	1,20
2	**Aliran langgeng tergantung:**1. Elevasi muka air normal sebelah hulu.2. Elevasi muka air sebelah hilir.Lereng US dan DS. Dengan gempa tanpa kerusakan digunakan 100% koefisien gempa desain.	**1. Efektif**	Dari analisis rembesan.	1,50	1,20
3	**Pengoperasian waduk tergantung:**1. Elevasi muka air maksimum diukir.2. Elevasi muka air minimum diukir (*dead storage*).Lereng US harus dianalisis untuk kondisi surut cepat.	**1. Efektif**	Surut cepat dari EL. muka air normal sampai EL. muka air minimum. Lereng US dan DS.	1,30	1,10
			Surut cepat dari EL. MA maksimum sampai EL. MA minimum. Pengaruh gempa diambil 0% dari koefisien gempa desain.	1,30	–
4	**Kondisi darurat tergantung:**1. Pembuntuan pada sistem drainase.2. Surut cepat karena pengurasan.3. Surut cepat keperluan darurat.	**1. Efektif**	Surut cepat dari EL. MA maksimum sampai EL. terendah bangunan pengeluaran. Pengaruh gempa diabaikan.	1,20	–

Catatan: Periksa standar tentang metode analisis stabilitas lereng dinamik bendungan tipe urugan.

Penentuan Kriteria Beban Bendungan.

Tabel 9. Data Umum

No.	Data Umum	Nilai
1	Kapasitas Tampungan	139,77 m^3
2	Tinggi Bendungan terhadap Dasar Galian	122 m
3	Kebutuhan Evakuasi	> 1000
4	Tingkat Kerusakan Hilir	Tinggi

Sumber: Pedoman Konstruksi (Pd T-14-2004-A). Analisa Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa.

Tabel 10. Faktor Resiko dan Bobot Angka

Faktor Risiko	Ekstrim	Tinggi	Moderat	Rendah
Kapasitas (10^6 m^3)	> 100	100 - 1.25	1.00 - 1.25	< 0.125
(FR_k)	6	4	2	0
Tinggi Bendungan (m)	> 45	45 - 30	30 - 15	< 15
(FR_t)	6	4	2	0
Kebutuhan Evakuasi (orang)	> 1.000	1.000 - 100	100 - 1	0
(FR_e)	12	8	4	0
Tingkat Kerusakan di Hilir	Sangat Tinggi	Tinggi	Agak Tinggi	Moderat
(FR_h)	12	10	8	4

Perhitungan angka bobot berdasarkan kriteria resiko.

Tabel 11. Kelas resiko bendungan dan bangunan air

No.	Uraian	Nilai	Nilai Bobot
1	Kapasitas Tampungan	139.77 m^3	6
2	Tinggi Bendungan terhadap Dasar Galian	122 m	6
3	Kebutuhan Evakuasi	> 1000	12
4	Tingkat kerusakan Hilir	Tinggi	12
	Total		**36**

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

Kriteria Beban Gempa untuk Desain Bendungan.

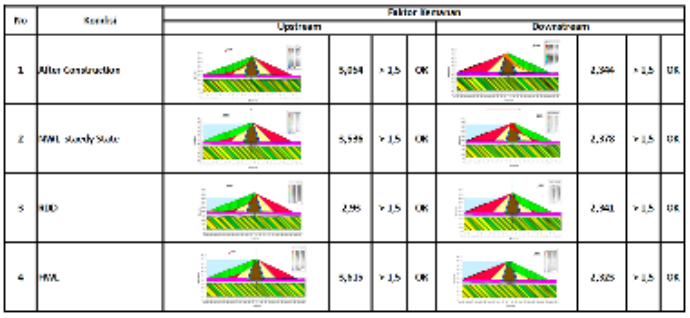
Tabel 12. Kriteria Beban Untuk Desain Bendungan

Kelas Risiko dengan Masa Guna	Persyaratan Tanpa Kerusakan – T (thn)	Persyaratan Tanpa Kerusakan – Metode Analisis	Diperkenankan Ada Kerusakan Tanpa Keruntuhan – T (thn)	Diperkenankan Ada Kerusakan Tanpa Keruntuhan – Metode Analisis
IV	**100–200**	**Koef. Gempa**	**10.000 (MDE)**	**Koef. Gempa atau Dinamik**
N = 50–100	**ad ≥ 0,1 g**	**Koef. Gempa**	**10.000 (MDE)**	**Koef. Gempa atau Dinamik**
III	50–100	Koef. Gempa	5.000 (MDE)	Koef. Gempa atau Dinamik
N = 50–100	ad ≥ 0,1 g	Koef. Gempa	5.000 (MDE)	Koef. Gempa atau Dinamik
II	50–100	Koef. Gempa	3.000 (MDE)	Koef. Gempa atau Dinamik
N = 50–100	ad ≥ 0,1 g	Koef. Gempa	3.000 (MDE)	Koef. Gempa atau Dinamik
I	50–100	Koef. Gempa	1.000 (MDE)	Koef. Gempa atau Dinamik
N = 50–100	ad ≥ 0,1 g	Koef. Gempa	1.000 (MDE)	Koef. Gempa atau Dinamik

Catatan:
Untuk bendungan besar dengan kondisi geologi setempat yang khusus, Peta Zona Gempa tidak dapat digunakan, dan perlu dilakukan studi gempa tersendiri.
Analisis Dinamik dapat dilakukan dengan analisis ragam sambutan gempa atau sejarah waktu percepatan gempa.

Sumber : Pedoman Konstruksi (Pd T-14-2004-A). Analisa Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa.

Nilai Faktor Keamanan Tanpa Gempa (Analisisi Statis).

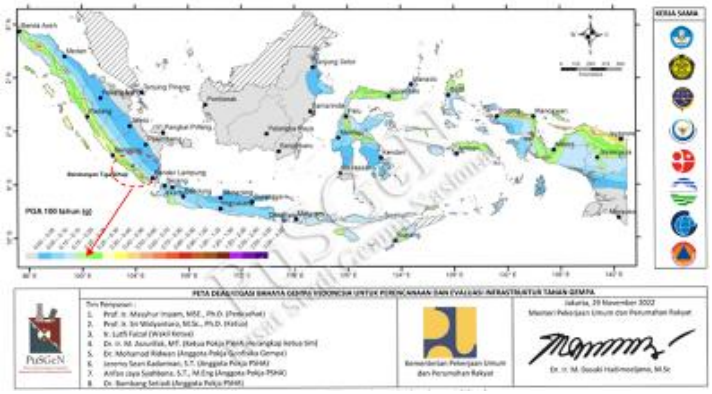


Gambar 10. Resume Nilai Faktor Keamanan Tanpa Gempa

Nilai Faktor Keamanan Tanpa Gempa (Analisis Statis) dari berbagai kondisi memenuhi kriteria yang dipersyaratkan sehingga tidak perlu perubahan geometri. Sehingga dilanjutkan dengan analisis stabilitas dinamik dengan metode koefisien gempa termodifikasi/OBE 145 tahun

Penentuan Kriteria Beban Gempa OBE Bendungan.

Analisis gempa yang dilakukan adalah persyaratan tanpa ada kerusakan pada ulang T = 145 tahun (OBE). Dari peta zona gempa di Indonesia berikut, nilai percepatan puncak di batuan dasar untuk periode ulang gempa untuk analisis perhitungan dengan menggunakan beban gempa OBE didapat angka 0,2 – 0,3 g dapat dilihat di lihat pada gambar Peta dibawah ini.



Gambar 11. Peta percepatan puncak didasar batuan (SB) untuk periode ulang 100 tahun

After Construction.

PGA OBE	0,3
Kh=ad/g	0,306122
Ko=a2 x Kh	0,15
Kh	
Y/H 0.25	0,153
Y/H 0.5	0,128
Y/H 0,75	0,083
Y/H 1	0,105
Kv	
Y/H 0.25	0,102
Y/H 0.5	0,085
Y/H 0,75	0,056
Y/H 1	0,070

HWL, NWL, RDD NWL, LWL
PGA OBE 0,3
Kh=ad/g 0,306122
Ko=a2 x Kh 0,15
Untuk o < Y/H ≤ 0,4
K = Ko x { 2,5 – 1,85 x (Y/h))}
Untuk 0,4 < Y/H ≤ 1,0
K = Ko x (2,0 – 0,6 x (Y/h))

Kh
Y/H 0.25 0,306
Y/H 0.5 0,255
Y/H 0,75 0,233
Y/H 1 0,210
Kv
Y/H 0.25 0,204
Y/H 0.5 0,170
Y/H 0,75 0,155
Y/H 1 0,140

Analisis stabilitas dilakukan dengan metode kesembangan batas dengan menggunakan koefisien gempa K yang keluarannya berupa faktor keamanan.

Nilai Faktor Keamanan (Analisis Stabilitas Dinamik) dengan metode koefisien gempa termodifikasi OBE 145 tahun.

No	Kondisi	Posisi Y/H	Faktor Keamanan							
			Upstream				Downstream			
1	After Construction	0,25		2,196	> 1,2	OK		2,085	> 1,2	OK
		0,5		2,248	> 1,2	OK		1,945	> 1,2	OK
		0,75		2,439	> 1,2	OK		1,986	> 1,2	OK
		1		2,243	> 1,2	OK		1,78	> 1,2	OK
2	Normal Water Level	0,25		1,411	> 1,2	OK		1,495	> 1,2	OK
		0,5		1,402	> 1,2	OK		1,466	> 1,2	OK
		0,75		1,379	> 1,2	OK		1,436	> 1,2	OK
		1		1,463	> 1,2	OK		1,406	> 1,2	OK
3	Rapid Draw Down	0,25		1,409	> 1,2	OK		1,511	> 1,2	OK
		0,5		1,244	> 1,2	OK		1,501	> 1,2	OK
		0,75		1,364	> 1,2	OK		1,465	> 1,2	OK
		1		1,359	> 1,2	OK		1,442	> 1,2	OK
4	High Water Level	0,25		1,507	> 1,2	OK		1,418	> 1,2	OK
		0,5		1,436	> 1,2	OK		1,427	> 1,2	OK
		0,75		1,408	> 1,2	OK		1,416	> 1,2	OK
		1		1,475	> 1,2	OK		1,486	> 1,2	OK

Gambar 12. Nilai Faktor Keamanan (Analisis Stabilitas Dinamik) dengan metode koefisien gempa termodifikasi OBE 145 tahun

Nilai Faktor Keamanan (Analisis stabilitas Dinamik dengan metode koefisien gempa termodifikasi), OBE 145 tahun :

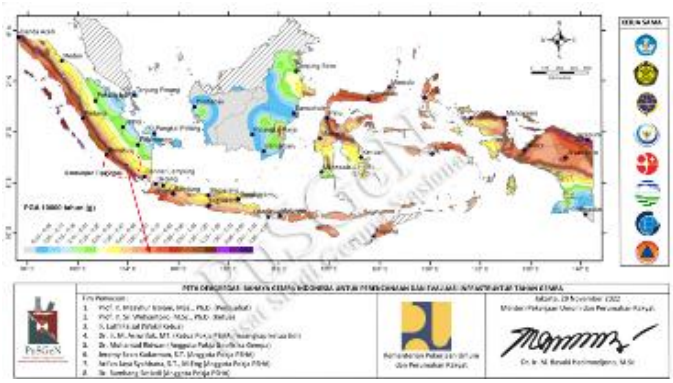
1. -Pada kondsisi after construction terlihat Fk terkeci 1,78 > 1,2
2. -Pada kondisi normal water level terlihat Fk terkecil 1,379 > 1,2

3. -Pada kondisi rapid draw down terlihat Fk terkecil 1,244 > 1,2
4. -Pada kondisi high water level terlihat Fk terkecil 1,408 > 1,2

dari berbagai kondisi diatas memenuhi kriteria yang dipersyaratkan (FK > 1,2) sehingga tidak perlu perubahan geometri sehingga dilanjut dengan analisis stabilitas dinamik dengan metode koefisien gempa termodifikasi / MDE 10.000 tahun

Penentuan Kriteria Beban Gempa MDE Bendungan.

Analisis gempa yang dilakukan adalah persyaratan tanpa ada kerusakan pada ulang T = 10.000 tahun (MDE). Dari peta zona gempa di Indonesia berikut, nilai percepatan puncak di batuan dasar untuk periode ulang gempa untuk analisis perhitungan dengan menggunakan beban gempa MDE didapat angka 0,7 – 0,8 g dapat dilihat di lihat pada gambar Peta dibawah ini.



Gambar 13. Peta percepatan puncak didasar batuan (SB) untuk periode ulang 10.000 tahun

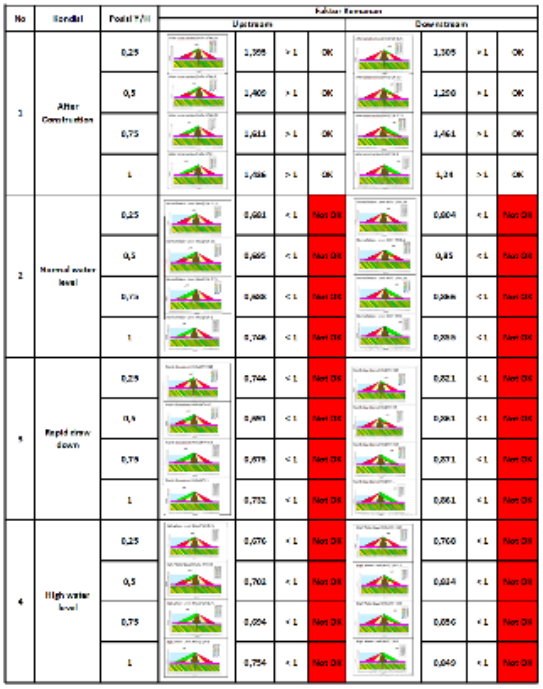
After Construction.
PGA MDE 0,75
Kh=ad/g 0,765
Ko=a2 x Kh 0,375
Kh
Y/H 0.25 0,382
Y/H 0.5 0,319
Y/H 0,75 0,209
Y/H 1 0,263
Kv
Y/H 0.25 0,265
Y/H 0.5 0,213
Y/H 0,75 0,139
Y/H 1 0,175
HWL, NWL, RDD NWL, LWL
PGA MDE 0,75
Kh=ad/g 0,765
Ko=a2 x Kh 0,375
Untuk o < Y/H ≤ 0,4
K = Ko x { 2,5 – 1,85 x (Y/h))}
Untuk 0,4 < Y/H ≤ 1,0
K = Ko x (2,0 – 0,6 x (Y/h))

Kh
Y/H 0.25 0,764
Y/H 0.5 0,638

Y/H 0,75 0,581
Y/H 1 0,525
Kv
Y/H 0.25 0,509
Y/H 0.5 0,425
Y/H 0,75 0,388
Y/H 1 0,350

Analisis stabilitas dilakukan dengan metode kesembangan batas dengan menggunakan koefisien gempa K yang keluarannya berupa faktor keamanan.

Nilai Faktor Keamanan (Analisis Stabilitas Dinamik) dengan metode Koefisien Gempa termodifikasi MDE 10.000 tahun.



Gambar 14. Nilai Faktor Keamanan (Analisis Stabilitas Dinamik) dengan metode koefisien gempa termodifikasi MDE 10.000 tahun

Nilai Faktor Keamanan (Analisis stabilitas Dinamik dengan metode koefisien gempa termodifikasi) MDE 10.000 tahun, hanya pada kondisi after construction yang memenuhi persyaratan sedangkan pada kondisi NWL, RDD, HWL nilai Faktor Keamananya tidak memenuhi persyaratan (FK < 1), lanjut dengan analisis alihan tetap dengan cara Makdisi – Seed (Alihan < 0,5 tinggi jagaan)

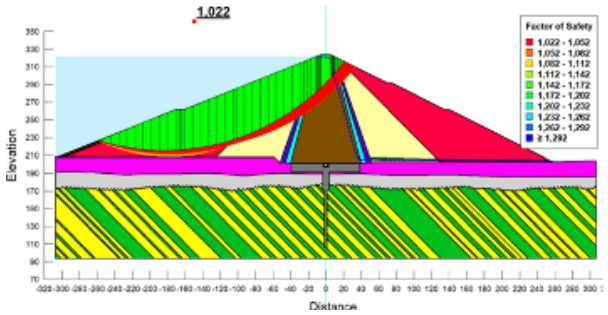
Analisis Gempa Alihan Tetap (Makdisi Seed)

1. Perhitungan Deformasi Umax (Kondisi Muka Air Normal/NWL).

Tabel 13. Perhitungan Deformasi Umax (Kondisi Muka Air Normal)

Y/T	PS	PGA	k	PS	PGA	K	PS	1,0	K_p	Keterangan/ Parameter	U (%)	Hasil
0,25	2,094	0,06	0,906	1,413	0,06	0,764	3,681	**NOT OK**	0,4628	0,6134	30	OK
0,50	2,094	0,06	0,906	1,402	0,06	0,825	2,829	**NOT OK**	0,5282	0,7528	20	OK
0,75	2,094	0,06	0,906	1,414	0,06	1,301	1,855	**NOT OK**	0,5964	0,8337	20	OK
1,00	2,094	0,06	0,906	1,418	0,06	1,766	1,277	**NOT OK**	0,6748	0,9045	15	OK
0,25	2,111	0,06	0,906	1,459	0,06	2,304	2,824	**NOT OK**	0,3478	0,7132	15	OK

Y/T	PS	PGA	k	PS	PGA	K	PS	1,0	K_p	Keterangan/ Parameter	U (%)	Hasil
0,50	2,111	0,06	0,906	1,456	0,06	1,967	0,539	**NOT OK**	0,3646	0,7764	5	OK
0,75	2,111	0,06	0,906	1,435	0,06	0,941	1,556	**NOT OK**	0,4048	0,8767	5	OK
1,00	2,111	0,06	0,906	1,420	0,06	2,588	2,837	**NOT OK**	0,4139	0,9524	5	OK

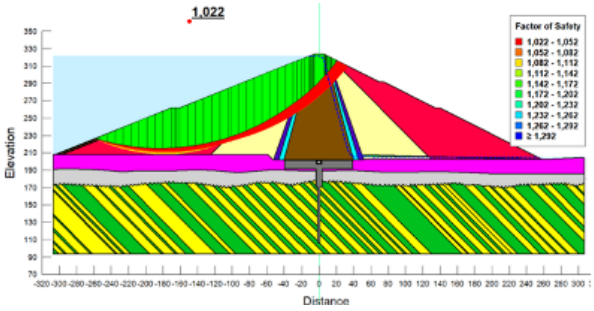


Gambar 15. (Kondisi Muka Air Normal)

2. Perhitungan Deformasi Umax (Kondisi Rapid Draw Down/RDD).

Tabel 14 Perhitungan Deformasi Umax (Kondisi Rapid Draw Down)

Y/T	PS	PGA	K	PS	PGA	K	PS	Status	K_γ	Keterangan/ Parameter	U (m)	U Max
0,25	1,86	0,306	1,460	OK	0,764	0,634	NOT OK	0,505	3,5521	22	OK	
0,50	1,86	0,295	1,314	OK	0,698	0,691	NOT OK	0,519	3,5516	25	OK	
0,75	1,86	0,271	1,164	OK	0,681	0,672	NOT OK	0,178	3,4811	24	OK	
1,00	1,86	0,210	1,136	OK	0,535	0,713	NOT OK	0,304	3,6165	25	OK	
Y/T	PS	PGA	K	PS	PGA	K	PS	Status	K_γ	Keterangan/Parameter	U (m)	U Max
0,25	2,41	0,306	1,511	OK	0,784	0,821	NOT OK	0,528	3,7705	10	OK	
0,50	2,41	0,255	1,501	OK	0,698	0,821	NOT OK	0,625	3,7133	5	OK	
0,75	2,41	0,271	1,462	OK	0,581	0,671	NOT OK	0,106	3,7411	4	OK	
1,00	2,41	0,210	1,443	OK	0,535	0,821	NOT OK	0,420	3,7600	4	OK	



Gambar 16. (Kondisi Rapid Draw Down/RDD)

3. Perhitungan Deformasi Umax (Kondisi Muka Air Banjir/HWL).

Tabel 15. Perhitungan Deformasi Umax (Kondisi Muka Air Banjir/HWL)

Y/H	PS	Status	k	PGA	Status	K	PS	1,0	Status	Ky	Ky/K max	U (cm)	U Max
0,25	2,413	OK	0,306	1,507	OK	0,667	0,634	1,0	Not OK	0,4520	0,2985	35	OK
0,50	2,413	OK	0,255	1,390	OK	0,702	0,691	1,0	Not OK	0,4281	0,5513	28	OK
0,75	2,413	OK	0,231	1,403	OK	0,661	0,675	1,0	Not OK	0,7733	0,6758	24	OK
1,00	2,413	OK	0,210	1,398	OK	0,761	0,695	1,0	Not OK	0,3648	0,6581	18	OK
Y/H	PS	Status	k	PGA	Status	K	PS	1,0	Status	Ky	Ky/K max	U (cm)	U Max
0,25	2,323	OK	0,306	1,518	OK	0,718	0,851	1,0	Not OK	0,5141	0,6718	30	OK
0,50	2,323	OK	0,255	1,427	OK	0,694	0,861	1,0	Not OK	0,4985	0,5912	10	OK
0,75	2,323	OK	0,231	1,416	OK	0,656	0,871	1,0	Not OK	0,4104	0,5528	10	OK
1,00	2,323	OK	0,210	1,384	OK	0,636	0,861	1,0	Not OK	0,437	0,5141	5	OK

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa material acak yang digunakan pada Bendungan Tiga Dihaji memiliki nilai sudut geser dalam (φ) sebesar 41,8° dan nilai kohesi (c) sebesar 0, yang diperoleh melalui Uji Geser Langsung Skala Penuh (1:1). Metode pengujian ini terbukti lebih representatif dibandingkan pengujian laboratorium skala kecil karena mampu mengakomodasi material berbutir kasar yang mendominasi bendungan tipe zona. Hasil analisis stabilitas menunjukkan bahwa bendungan memenuhi persyaratan faktor keamanan pada kondisi tanpa gempa serta analisis dinamik metode koefisien gempa termodifikasi OBE 145 tahun, sehingga tidak memerlukan perubahan geometri. Pada analisis MDE 10.000 tahun, hanya kondisi after construction yang memenuhi persyaratan, sedangkan kondisi lainnya memerlukan evaluasi deformasi menggunakan metode Makdisi–Seed. Hasil evaluasi menunjukkan deformasi maksimum sebesar 55 cm masih lebih kecil dari setengah tinggi jagaan yang diizinkan, sehingga Bendungan Tiga Dihaji di Provinsi Sumatera Selatan dinyatakan aman terhadap pembebanan gempa yang digunakan dan memenuhi ketentuan dalam Pedoman Analisa Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Gempa (Pd.T-14-2004-A).

REFERENSI

Abbas, J. M., Aljanabi, Q. A., & Mutiny, Z. A. (2017). *Slope Stability Analysis of an Earth Dam*.

Boudia, A., Berga, A., Boudia, S., & Hussain, S. K. (2021). The Detailed Study on the Development of the Triaxial Equipment in the Soil Mechanics: A Review. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, *2*(6), 67–76. https://doi.org/10.54660/anfo

Demidrogen, S., & Yildirim, S. (2024). Geostatistical Estimation and Simulations in Dam, Hydrogeological and Geotechnical Research: A Comprehensive Review. *Earth Sciences Research Journal*.

Ferreira, B. S., Almeida, M. S. S., Lopes, F. R., Cavalcanti, M. D. C., & Filho, C. J. P. (2022).

On the Use of Random Material in Dam Cores: Case of the Manso Dam, Brazil. *Geotechnical and Geological Engineering*, *40*, 1973–1987. https://doi.org/10.1007/s10706-021-02003-7

Fu, Z., Chen, S., Ji, E., Li, G., & Lu, Y. (2020). *Using Clay-Gravel Mixtures as the Impervious Core Materials in Rockfill Dams* (Z. Fu & E. B. T.-D. E. – R. A. in D. and A. Bauer (eds.); p. 1). IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.93206

Hakim, A. M., Kamarudin, S. A., Sahadewa, A., Nazir, R., & Setyawan, H. E. (2023). Effect of Grain Size Distribution on Shear Strength Characteristic of Random Fill Material at Keureuto Dam, Indonesia. *Key Engineering Materials*, *970*, 151–156. https://doi.org/10.4028/p-h30Laq

Haselsteiner, R., Pamuk, R., & Ersoy, B. (2017). Aspects Concerning the Shear Strength of Rock-Fill Material in Rock Dam Engineering. *Geotechnik*, *10*(3), 193–203. https://doi.org/10.1002/gete.201600099

Institution, B. S. (2022). *Methods of Test for Soil for Civil Engineering Purposes – Classification Test and Determination of Geotechnical Properties*. BSI.

Lade, P. V. (2016). *Triaxial Testing of Soils*. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/9781119106616

Luna, R. A. C., Morillo, L. A. B., Tanap, J. M. I., & Zarco, M. A. H. (2020). *Geotechnical and Seismic Design Consideration for Mine Tailings Dam*.

Ma, H., & Chi, F. (2016). Major Technologies for Safe Construction of High Earth-Rockfill Dams. *Engineering*, *2*(4), 498–509. https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.001

Material, A. S. T. and. (2023). *Standard Test Method for Direct Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. ASTM International.

Nasional, B. S. (2015). *Tata Cara Desain Tubuh Bendungan Tipe Urugan*. Badan Standardisasi Nasional.

Nasional, B. S. (2016). *Faktor Keamanan Untuk Stabilitas Bendungan*. Badan Standardisasi Nasional.

Nasional, B. S. (2019). *SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Badan Standardisasi Nasional.

Officials, A. A. of S. H. and T. (2022). *Standard Method of Test for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. AASHTO.

Sahadewa, A. (2023). Case History of Random Material Shear Strength Evaluation Using In-situ Large Scale Direct Shear Test in the Construction of the Longest Dam in South-east Asia. In *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering & 4th AsRTC6 Urban Geoengineering Symposium. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (p. 12011). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1249/1/012011

Sahadewa, A., Setyawan, H., Tanjung, M., Pamumpuni, A., Hakim, A. M., Langit, J., Herry, P., & Wibowo, A. (2022). Construction Failure of X Dam: The Importance of Field Monitoring. In *11th International Symposium of Field Monitoring in Geomechanics 2022, ISSMGE TC220* (pp. 1–7).

Salmasi, F., & Abraham, J. (2022). *Geological Considerations in Dam Engineering*.