

ANALISIS STABILITAS BENDUNGAN WAY-APU TERHADAP BEBAN GEMPA MENGGUNAKAN METODE PSHA

Kamil Johanes Paransa¹, Sri Amini Yuni Astuti^{2*}, Muhammad Rifqi Abdurrozak², Anisa Nur Amalina²

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

² Staf Pengajar Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

Article Info

Available online

Keywords:

Way Apu Dam

PSHA

Static Stability Analysis

Dynamic Stability Analysis

Corresponding Author:

Sri Amini Yuni Astuti

amini_yuni@uii.ac.id

Abstract

Indonesia is a nation that has relatively high seismic and volcanic activities and is vulnerable to earthquakes. Therefore, the buildings must be calculated by considering earthquake load. Most structures, like earth-fill dams, have an increased risk when structural failure happens. The point of this study is to understand the seismic hazard and the dam stability of Way Apu dam that's located approximately in the Waepo sub-district, of the Buru District, from the Province of Maluku, using Pseudostatic Seismic Hazard Analysis (PSHA) for the seismic hazard, and Static and Dynamic analysis for the dam stability. The result shows that the peak ground acceleration with 100 and 10.000 years of recurrence are 0.206 and 0.767, which will use as the Operational Basis Earthquake and Maximum Design Earthquake, respectively, on the static stability analysis and dynamic stability analysis. An operational basis for earthquakes with various water levels, the Way Apu dam mainly fulfills the safety factor criteria, except when maximum design earthquake is concerned. Per the rule of Pd-T 14-2004-A, dynamic stability analysis is conducted to calculate the deformity of an earthquake. After completing the dynamic stability analysis, we can conclude that Way Apu dam fulfilled the safety factor criteria.

Copyright © 2023 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

PENDAHULUAN

Latar belakang

Indonesia merupakan negara yang terletak di antara tiga lempeng tektonik utama, yaitu lempeng *Eurasia*, lempeng Indo-Australia, dan lempeng Pasifik. Interaksi antara ketiga lempeng tersebut dan kawasan Indonesia yang terletak pada daerah *Ring of Fire*

menyebabkan Indonesia menjadi salah satu negara yang memiliki aktifitas seismik dan vulkanik paling tinggi di dunia dan rawan terhadap bahaya gempa.

Konstruksi bendungan di Indonesia tidak hanya perlu memperhatikan kestabilan terhadap keruntuhan akibat massa tanah saja,

namun juga kestabilan bendungan terhadap beban gempa yang bekerja pada dalam berbagai kondisi muka air waduk. menyebabkan kerusakan dan keruntuhan bangunan atau infrastruktur yang mengakibatkan kerugian besar baik dalam bentuk kerugian nyawa ataupun untuk proses rekonstruksi dan rehabilitasi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji stabilitas bendungan urugan Way Apu terhadap beban gempa. Bendungan Way Apu merupakan bendungan urugan zonal inti tegak yang terletak pada daerah Kecamatan Waepo, Kabupaten Buru, Provinsi Maluku yang memiliki fungsi utama sebagai pengendali aliran sungai Way Apu agar tidak terjadinya banjir pada semua daerah irigasi, khususnya sebagian besar wilayah Kecamatan Waepo maupun wilayah Kecamatan Waelata serta kecamatan lainnya pada umumnya.

Bendungan urugan

Bendungan urugan adalah bendungan yang dibangun dari timbunan bahan-bahan seperti batu, krakal, kerikil, pasir serta tanah ada komposisi tertentu berfungsi sebagai pengangkat permukaan air yang terdapat dalam waduk (Sosrodarsono, 1977). Bendungan tipe urugan zonal adalah bendungan yang memiliki gradasi butiran tanah penyusun yang berbeda masing-masing lapisan tertentu. Pada bendungan dengan tipe zonal, material penyangga bendungan dibebankan pada urugan yang mampu meloloskan air. Sedangkan material kedap air digunakan sebagai urugan yang menahan air..

Analisis bahaya Gempa

Metode dalam analisis bahaya gempa atau *seismic hazard analysis* terdapat dua metode yang dapat digunakan yaitu *Deterministic Seismic Hazard Analysis* dan *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*. Dalam melakukan analisis digunakan metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) dipilih karena dapat memperkirakan kemungkinan besar probabilitas gempa itu akan terjadi. Kelebihan dari metode PSHA tidak dapat diakomodasi oleh DSHA, walaupun dalam memperkirakan skenario terburuk kejadian

gempa di suatu wilayah lebih sederhana dibandingkan dengan PSHA. *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) menyediakan kerangka kerja yang dapat mengidentifikasi ketidakpastian tentang ukuran, lokasi dan tingkat kejadian dari gempa bumi. Pada dasarnya, metode PSHA adalah analisis yang dikembangkan oleh Mc. Guire (1976) berdasarkan konsep probabilitas dari Cornell (1968). Metode ini menggunakan variasi skenario yang melibatkan frekuensi *ground motion*, dengan mengasumsikan kejadian gempa magnitudo M dan jarak hiposenter R adalah variabel acak independen yang kontinu. Variasi skenario juga melibatkan sifat acak gempa bumi seperti lokasi pusat gempa, besarnya gempa, dan tingkat kejadian gempa.

Katalog gempa

Katalog gempa adalah salah satu elemen penting dalam analisis resiko kegempaan. Katalog data gempa merupakan sumber utama dalam menentukan parameter seismik yang akan menjadi input dalam proses analisis resiko gempa. Data yang didapat dari katalog gempa harus dipersiapkan sebelum dapat dianalisis. Adapun tahapan persiapan data gempa itu akan dibahas pada bagian berikut ini.

Penyeragaman Magnitudo Gempa

Data rekam gempa yang diperoleh dalam tahap pengumpulan data dari katalog gempa. Data yang diperoleh diseragamkan skala magnitudo untuk dibuat katalog gempa yang akan di analisis. Data awal rekam gempa tersebut memiliki berbagai macam skala magnitudo seperti *moment magnitude* (MW), *surface wave magnitude* (MS), *body wave magnitude* (Mb) dan *Richter local magnitude* (ML).

Declustering Data Gempa

Katalog data gempa yang digunakan dalam proses analisis seismik resiko gempa harus merupakan data rekam gempa independen (*mainshock*). *De-clustering* merupakan proses identifikasi dan pemisahan data gempa dependen yaitu gempa rintisan (*foreshock*)

dan susulan (*aftershock*) terhadap gempa utama (*mainshock*). Kriteria empiris untuk memisahkan gempa dependen tersebut diusulkan oleh Arabasz & Robinson (1976), Gardner & Knopoff (1974) dan Uhammer (1986). Kriteria ini dikembangkan berdasarkan rentang waktu dan jarak tertentu dari satu kejadian gempa besar.

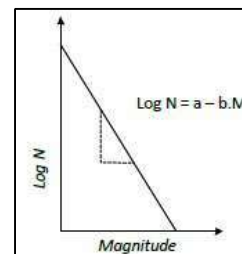
Analisis kelengkapan data gempa

Asrurifak (2010) menyatakan ketidaklengkapan data gempa akan mengakibatkan parameter resiko gempa yang dihasilkan menjadi *overestimated* atau *underestimated*. Stepp (1973) mengusulkan suatu kriteria untuk menguji kelengkapan data rekam gempa. Untuk mengetahui periode dimana suatu katalog gempa yang digunakan cukup lengkap, frekuensi kejadian gempa independen untuk beberapa rentang magnitudo diplotkan terhadap waktu yang dihitung dari waktu pengamatan terakhir kebelakang. Frekuensi kejadian gempa (λ) didefinisikan sebagai jumlah kejadian gempa (N) selama selang waktu tertentu (T) dibagi dengan T , dengan asumsi bahwa *seismic rate* konstan untuk rentang periode yang lama sewaktu dimana frekuensi kejadian gempa mulai menurun secara signifikan menyatakan suatu batas waktu dimana katalog gempa sebelumnya tidak lengkap.

Earthquake recurrence parameter

Data rekam kegempaan suatu daerah diperoleh dari rekaman di masa lalu dapat digunakan untuk mengetahui resiko tercapainya atau terlampauinya suatu intensitas gerakan tanah setempat di masa yang akan datang. Perhitungan resiko gempa dilakukan dengan dasar informasi kegempaan dari suatu daerah, diantaranya adalah pencatatan gempa yang pernah ada pada lokasi tinjauan, sejarah kejadian gempa pada daerah yang dalam radius lokasi tinjauan dan data geologi berupa zona potensi sumber gempa daerah yang ditinjau. *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) memerlukan suatu model perulangan gempa dengan magnitudo yang bervariasi. Model kemunculan gempa (*Earthquake Recurrence*

Model) yang diberikan oleh beberapa peneliti digunakan untuk memperkirakan besarnya resiko kemunculan suatu kejadian gempa pada suatu periode perulangan tertentu. *Earthquake Recurrence Model* yang sering digunakan dalam analisis PSHA merupakan *Least Square Method* (Gutenberg & Richter, 1954), yaitu pemodelan hubungan magnitudo versus frekuensi seperti gambar berikut.



Gambar 1. *Earthquake Recurrence Model*
Pemodelan sumber gempa

Dalam permodelan sumber gempa, dilakukan tiga permodelan pada aplikasi RCRISIS yaitu antara lain *Area Source*, *Geometry Source*, *Seismicity Source*.

Hazard maps

Hazard maps merupakan input peta dengan format *shapefile* (.shp) dalam analisis kegempaan menggunakan *software* RCRISIS 20.0. Analisis kegempaan yang dilakukan mencakup satu wilayah, hal ini dikarenakan R-CRISIS 20.0 tidak dapat menganalisis kegempaan pada satu titik tinjauan. Peta wilayah yang digunakan adalah peta wilayah daerah administratif dalam lingkup kabupaten. Peta yang menjadi input dalam analisis adalah peta Kabupaten Buru.

Exceedance probability

Exceedance Probability untuk *hazard maps* adalah tetapan *exceedance probability* untuk keseluruhan peta *hazard* yang akan memunculkan hasil intensitas yang berkaitan dengan *exceedance probability* yang menjadi masukan. Perhitungan *exceedance probability* untuk masing-masing kala ulang kejadian gempa menggunakan Persamaan 1 sebagai berikut.

$$1 - \exp\left(\frac{\text{time frame}}{\text{kala ulang kejadian}}\right) \quad (1)$$

Fungsi atenuasi dan logic tree

Fungsi atenuasi merupakan fungsi yang menggambarkan hubungan antara magnitudo (M), intensitas (i) gerakan tanah setempat, dan jarak (R) dari sumber daerah pusat gempa. Perkiraan fungsi atenuasi untuk gerakan tanah akibat gempa, telah menjadi subjek yang menarik dalam penelitian bidang kegempaan. Fungsi atenuasi merupakan alat yang penting dalam mengaplikasikan resiko kegempaan dalam perencanaan bangunan tahan gempa. Penggunaan fungsi atenuasi untuk perhitungan PGA memiliki faktor yang mempengaruhi fungsi atenuasi yang digunakan, antara lain mekanisme gempa, jarak episenter dan kondisi tanah lokal.

Logic tree adalah suatu kerangka kerja untuk mengatasi nilai ketidak-pastian parameter yang dipakai pada saat perhitungan analisa resiko gempa dengan menggunakan metode PSHA. Nilai ketidakpastian parameter didapat dari Persamaan atenuasi, parameter resiko gempa dan magnitudo maksimum. Pendekatan *logic tree* memungkinkan penggunaan beberapa alternatif metode atau model dalam analisis, dimana tiap model yang digunakan untuk suatu parameter akan dikalikan dengan suatu faktor bobot yang merepresentasikan keakuratan relatif suatu model terhadap model lainnya (Irsyam dkk., 2010).

Deagregasi

Metode PSHA pada dasarnya adalah metode yang digunakan untuk menghitung ancaman gempa, berdasarkan dari kumpulan hasil semua kejadian gempa yang mungkin dapat terjadi di masa datang. Kejadian gempa yang mungkin akan datang tidak dapat terlihat jelas dalam PSHA. Kondisi ini menjadikan PSHA menjadi kurang lengkap memberikan informasi tentang paramter gempa yaitu M dan R yang dominan dalam desain gempa. Sebagai pelengkap metode PSHA maka diperlukan deagregasi terhadap setiap sumber gempa yang dimodelkan. Deagregasi diperlukan dalam pemilihan data *ground*

motion/ akselerogram yang sesuai dengan karakteristik gempa di wilayah tinjauan. Deagregasi menghasilkan *controlling magnitudo* ($M_{controlling}$) dan *controlling distance* ($R_{controlling}$) gempa yang memberikan kontribusi terbesar dalam PSHA. *controlling magnitudo* ($M_{controlling}$) dan *controlling distance* yang diperoleh berdasarkan titik berat dari kurva deagregasi (Riza, 2010).

Amplifikasi

Kelas situs perlu diidentifikasi untuk merumuskan kriteria desain seismik suatu bangunan di permukaan tanah untuk menentukan amplifikasi besaran percepatan gempa puncak dari batuan dasar ke permukaan tanah untuk suatu situs. Profil tanah di situs harus diklasifikasikan berdasarkan profil tanah lapisan 30 m paling atas sesuai dengan aturan SNI 1726-2012 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung yang disajikan pada Tabel. 1 sebagai berikut.

Kelas situs	V_s (m/s)	N	S_u (Kpa)
SA	>1500	N/A	N/A
SB	750-1500	N/A	N/A
SC	350-750	>50	>100
SD	175-350	15-50	50-100
SE	<150	<15	<50

(sumber : SNI 1726. 2012)

Time History

Peak ground acceleration merupakan percepatan tanah maksimum yang dapat dihitung dengan menggunakan metode model empiris berdasarkan data historis gempa maupun menggunakan fungsi atenuasi berdasarkan jenis sumber gempa yang terjadi. Nilai percepatan tanah dasar tersebut akan digunakan dalam penentuan *ground motion*. Rekaman riwayat gempa yang diambil harus memiliki magnitudo, jarak patahan dan mekanisme sumber gempa yang konsisten dengan hal-hal yang mengontrol ketentuan gempa maksimum yang dipertimbangkan. Analisis riwayat waktu harus menggunakan paling sedikit dibutuhkan tiga ragam gerak tanah (*strong ground motion*) yang berbeda, seperti yang diatur dalam Pasal 11.1.3 dalam SNI 1726- 2012. Penskalaan *strong ground motion* dilakukan dengan metode superposisi

yang dicetuskan oleh Seed-Idriss (1969).

Analisis Stabilitas Bendungan Urugan

Analisis stabilitas bendungan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

Analisis Statik

Pangular (1985) menyatakan analisis kestabilan bendungan tipe urugan memiliki cara yang sama dengan analisis kestabilan lereng. Perhitungan kestabilan lereng melalui rumus empiris dengan metode *limit equilibrium* seperti metode *Fellinius (Ordinary)*, *Modified Bishop*, *Janbu*, *Morgenstern and Price* dan *Spencer*. Metode kedua dengan *Finite Element Method (stress deformation analysis)* dimana pada metode tersebut memperhitungkan tegangan regangan tanah dan batuan, sehingga dapat memprediksikan pergerakan pada bendungan.

Finite Element Method (FEM) biasanya digunakan pada geomteri bendungan yang tidak beraturan, *nonlinear stress*, dan *complex boundary conditions*. Analisis stabilitas statik bendungan ini menggunakan metode FEM, dimana tidak dilakukan asumsi bidang longsor. Faktor keamanan didapatkan dengan cara mengurangi nilai kohesi c , dan sudut geser dama tanah (ϕ) secara bertahap hingga tanah mengalami keruntuhan.

Analisis Dinamik

Metode dinamik adalah analisis terhadap beban gempa yang besarnya (intensitasnya) berubah-ubah menurut waktu. Beban gempa tersebut menghasilkan tegangan normal dinamik dan tegangan geser sepanjang daerah yang berpotensi longsor. Hasil dari perhitungan metode dinamik adalah *displacement*. *Displacement* adalah besaran perubahan posisi dan dimensi dari suatu benda. *Displacement* dapat diartikan sebagai perubahan kedudukan atau pergerakan suatu titik pada suatu benda secara absolut maupun relatif. Dikatakan titik bergerak absolut apabila dikaji dari perilaku gerakan titik itu sendiri dan dikatakan relatif apabila gerakan itu dikaji dari titik yang lain. Perubahan kedudukan atau pergerakan suatu titik pada umumnya mengacu kepada suatu sistem kerangka referensi (absolut atau relatif).

Analisis Beban Gempa

Penelitian ini dilakukan menggunakan beberapa parameter beban gempa. Beban gempa yang akan digunakan untuk desain bendungan baru atau evaluasi keamanan bangunan yang ada tergantung pada kondisinya. Bendungan dapat dievaluasi terhadap satu atau beberapa beban gempa.

Analisis stabilitas bendungan urugan akibat beban gempa, beban gempa yang digunakan adalah *Safety Evaluation Earthquake (SEE)*. *Safety Evaluation Earthquake* merupakan nama pengganti dari MDE (*Maximum Design Earthquake*) (ICOLD, 2016). SEE merupakan gempa maksimum yang mungkin terjadi, yang memberikan pengaruh terhadap bendungan tanpa terjadi keruntuhan. Kerusakan boleh terjadi, dan sifatnya dapat diperbaiki secepatnya dan tidak boleh terjadi pelepasan air dari bendungan yang tidak terkontrol. Gempa SEE dinyatakan sebagai gempa dengan periode ulang 10.000 tahun apabila dihitung dengan cara PSHA dan 84 *persentile* apabila dihitung dengan DSHA.

Metode penelitian

Pengumpulan data parameter geoteknik bendungan

Input parameter tubuh bendungan yang digunakan untuk analisis stabilitas bendungan didapat berdasarkan data sekunder. Ketidaklengkapan data yang tersedia menjadikan sulit dalam pemodelan, sehingga diperlukan adanya korelasi. Beberapa nilai parameter tanah dengan bantuan korelasi menggunakan acuan SNI 8064:2016. antara lain kadar air (w), berat jenis tanah (G_s), modulus elastisitas (E), dan *poisson ratio* (ν), angka pori (e), berat isi basah (γ_b) dan berat isi jenuh (γ_{sat}).

Analisis Beban Gempa Probabilistic Seismic Hazard Analysis

Tahapan proses analisis beban gempa (*probabilistic seismic hazard analysis*) adalah pencarian data rekam gempa, penyeragaman magnitudo, *declustering*, analisis kelengkapan daa gempa, pemodelan area sumber gempa, perhitungan parameter seismik gempa,

penentuan fungsi atenuasi dan *logic-tree*, percepatan gempa maksimum dan *seismic hazard curved*, deagregasi, penentuan *ground motion* dan amplifikasi nilai percepatan gempa.

Analisis Stabilitas Bendungan

Analisis yang digunakan untuk stabilitas tubuh bendungan menggunakan metode statik dan dinamik. Tahap pemodelan analisis ini dilakukan dengan bantuan program *GeoStudio* 2018. Analisa stabilitas statik dan dinamik dilakukan pada kondisi 3 muka air waduk sesuai pada SNI 8064:2016 yaitu sebagai berikut.

- 1 Muka air waduk kosong dengan elevasi + 84.88 m.
- 2 Muka air waduk normal dengan elevasi + 96.50 m.
- 3 Muka air waduk banjir dengan elevasi +99.75 m.

Analisis statik

Analisis statik merupakan pemodelan bendungan tanpa adanya beban gempa. Tahap analisis ini menggunakan *Sigma/W* dan *Slope/W* dalam *Geosudio* 2018. Faktor keamanan minimum (FK) menggunakan acuan SNI 8064:2016. Nilai minimum keamanan lereng untuk bendungan urugan disajikan pada Tabel berikut.

Tabel 2 Syarat FK berdasarkan SNI 8064-2016)

No	Kondisi muka air waduk	Elevasi (m)	FK Minimum
1	Muka Air Waduk Kosong	+ 84.88	1,5
2	Muka Air Waduk Normal	+ 96.50	1,3
3	Muka Air Waduk Banjir	+ 99.75	1,5

Analisis dinamik

Analisis dinamik merupakan pemodelan bendungan menggunakan beban gempa. Tahap analisis ini menggunakan gabungan *Sigma/W* dan *Quake/W* dalam *GeoStudio* 2018. Analisa Dinamik dilakukan beban SEE mengacu pada aturan Pd-T-14-2004- A. Hasil analisis dinamik adalah nilai *displacement* bendungan akibat gempa. Angka aman adanya *displacement* pada bendungan adalah setengah dari tinggi jagaan, dimana tinggi

jagaan pada bendungan yang ditinjau sebesar 3 m.

Alur Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan mengumpulkan data parameter tanah dari masing masing zonal bendungan yang didalamnya termasuk berat isi kering (γ_s), berat isi basah (γ_t), berat isi jenuh (γ_o), serta sudut geser dalam total (Φ) dan efektif (Φ') yang didapat PT. Indra Karya selaku konsultan pada proyek bendungan WayApu. Langkah selanjutnya dalam penelitian ini adalah mengumpulkan data katalog rekam gempa yang didapat dari instansi *United States Geological Survey* (USGS), *Advanced National Seismic System* (ANSS), dan *International Seismological Centre* (ISC) dimana data data tersebut dibatasi oleh parameter yaitu jarak dari bendungan tinjauan adalah 500 km dengan kedalaman kejadian gempa dari 0 sampai dengan 300 km, serta *range* magnitude gempa yang diambil adalah dari 4.0 sampai dengan 9.0 skala richter dengan time frame dimulai dari 1 Januari 1900 hingga 31 Desember 2021. Dari data katalog rekam gempa yang sudah dikumpulkan, langkah selanjutnya yaitu dilakukan penyeragaman magnitude menggunakan *software Microsoft Excel* dan Persamaan konversi skala magnitude wilayah Indonesia, kemudian dari hasil yang sudah di konversi dilakukan *declustering* data rekam gempa menggunakan *software Zmap 7.0*, dimana proses ini bertujuan untuk memisah data gempa utama dari data gempa susulan dan gempa *background* (*foreshock* dan *aftershock*). Setelah proses *declustering*, tahap selanjutnya adalah analisis kelengkapan atau *completeness analysis* menggunakan metode *Stepp* dengan bantuan *Zmap 7.0* agar data rekam gempa yang dibutuhkan untuk analisis PSHA agar tidak *overestimate* ataupun *underestimate*, yang dapat disebabkan oleh ketidakseragaman jaringan stasiun pemantauan gempa. Kemudian dilakukan penentuan zona sumber gempa, yang dibutuhkan dalam analisis PSHA sebagai hubungan antara gempa dan model perhitungan yang digunakan untuk menentukan tingkat resiko gempa, proses

dilakukan menggunakan bantuan *software ArcGIS* dengan plugin *ArcMap* serta peta wilayah administratif Indonesia untuk menentukan zona subduksi, zona *fault*, serta zona *background*. Berikutnya dilakukan analisis PSHA dengan menggunakan *Software R-Crisis*, dimana output dari proses ini adalah peta *Peak Ground Acceleration* serta probabilitas kejadian gempa terjadi pada kala waktu tertentu. Dari semua data data yang telah dikumpulkan dari data parameter tanah sampai dengan *Peak Ground Acceleration* dan probabilitas terjadinya gempa dengan kala ulang tertentu, Langkah selanjutnya adalah untuk melakukan analisis stabilitas statik dan dinamik yang akan hasil dari analisis tersebut akan disajikan dibawah ini

Hasil dan pembahasan

Analisis Stabilitas Statik Bendungan

Hasil simulasi statis Bendungan Way – Apu untuk kondisi tanpa gempa, gempa OBE, dan gempa MDE ditunjukkan pada Tabel 3 sampai Tabel 5. Hasil analisis menunjukkan bahwa stabilitas di hulu dan hilir bendungan dalam tanpa gempa dan gempa OBE dalam kondisi aman karena memiliki FK di atas syarat FK minimum. Pada simulasi kondisi gempa MDE (Tabel 5), stabilitas bendungan berada di bawah nilai FK minimum sehingga dalam kondisi tidak aman.

Tabel 3 Hasil Simulasi Statis Bendungan Way-Apu Tanpa Beban Gempa

No.	Kondisi	FK min.	y/h	FK	
				Hulu U/S	Hilir D/S
1	Selesai masa konstruksi, air kosong dan tanpa gempa	1,3	-	2,578	2,247
2	Kondisi air <i>steady state</i> , muka air Normal / <i>Normal Water Level (NWL)</i> +96,5 m tanpa gempa	1,5	-	3,072	2,243
3	Kondisi muka air banjir/ <i>Flood Water Level (FWL)</i> +98,8 m tanpa gempa	1,3	-	3,210	2,243
4	Kondisi muka air minimum/ <i>Low Water Level (LWL)</i>	1,3	-	2,397	2,243

+79,75 m tanpa gempa					
5	Kondisi surut cepat (<i>Rapid Drawdown</i>) dari muka air normal +96,5 m ke muka air Minimum +79,75 m tanpa gempa	1,3	-	2,429	2,148
6	Kondisi darurat surut cepat (<i>Rapid Drawdown</i>) dari muka air Maksimum +98,8 m ke muka air Minimum +79,75 m tanpa gempa	1,3	-	2,382	1,955

Tabel 4 Hasil Simulasi Statis Bendungan Way-Apu Dengan Beban Gempa OBE

No	Kondisi	FK min.	y/h	FK	
				Hulu U/S	Hilir D/S
1	Selesai masa konstruksi, air kosong dan dengan beban gempa 50% gempa OBE	1,2	0,25	1,614	1,534
			0,50	1,625	1,621
			0,75	1,717	1,527
			1,00	1,749	1,578
2	Kondisi air <i>steady state</i> , muka air normal/ <i>Normal Water Level (NWL)</i> +96,5 m dengan beban gempa 50% gempa OBE	1,2	0,25	1,683	1,534
			0,50	1,637	1,621
			0,75	1,460	1,527
			1,00	1,543	1,578
3	Kondisi muka air banjir / <i>Flood Water Level (FWL)</i> +98,8 m dengan gempa OBE	1,2	0,25	1,780	1,534
			0,50	1,711	1,621
			0,75	1,494	1,527
			1,00	1,579	1,578
4	Kondisi muka air minimum/ <i>Low Water Level (LWL)</i> +79,75 m dengan gempa OBE	1,2	0,25	1,611	1,534
			0,50	1,479	1,621
			0,75	1,340	1,527
			1,00	1,404	1,578
5	Kondisi surut cepat dari muka air normal +96,5 m ke muka air minimum +79,75 m, dengan gempa OBE	1,1	0,25	1,152	1,314
			0,50	1,249	1,389
			0,75	1,296	1,424
			1,00	1,352	1,465
6	Kondisi darurat surut cepat dari muka air normal +98,8 m ke muka air minimum +79,75 m dengan gempa OBE	1,1	0,25	1,187	1,269
			0,50	1,288	1,340
			0,75	1,337	1,374
			1,00	1,395	1,413

Tabel 5 Hasil Simulasi Statis Bendungan Way-Apu Dengan Beban Gempa MDE

No	Kondisi	FK min.	FK		
			y/h	Hulu U/S	Hilir D/S
			0,25	0,847	0,813
1	Selesai masa konstruksi, air kosong dan dengan beban gempa 50% gempa MDE	1,0	0,50	0,887	0,888
			0,75	0,945	0,864
			1,00	0,985	0,913
			0,25	0,790	0,813
2	Kondisi air <i>steadystate</i> , muka air normal/ <i>Normal Water Level</i> (NWL) +96,5 m dengan beban gempa 50% gempa MDE	1,0	0,50	0,778	0,888
			0,75	0,706	0,864
			1,00	0,747	0,913
			0,25	0,597	0,707
3	Kondisi surut cepat dari muka air normal +96,5 m ke muka air minimum +79,75 m dengan gempa MDE	1,0	0,50	0,660	0,777
			0,75	0,695	0,817
			1,00	0,736	0,859

Analisis stabilitas dinamik bendungan

Sedangkan untuk beban gempa MDE tidak memenuhi persyaratan angka keamanan. Sesuai dengan Pd T-14-2004-A, pada kondisi yang tidak memenuhi angka keamanan perlu dilakukan analisis dinamik untuk menghitung deformasi 45 meter. Hasil dari analisis dinamik menunjukkan bahwa bendungan dalam keadaan aman karena memiliki angka aman lebih besar dibanding FK minimum. Hasil analisis disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6 Hasil Analisis Stabilitas Dinamik Bendungan

No	Kondisi	FK minimum	FK Hulu	FK Hilir
1	Setelah masa konstruksi	1,0	5,377	1,16
2	Aliran <i>steady state</i>	1,0	1,326	1,057
3	<i>Rapid drawdown</i>	1,0	1,491	1,065

Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi analisis kestabilan lereng bendungan statik dengan kondisi tanpa gempa dan gempa OBE, bendungan Way - Apu memenuhi kriteria angka keamanan, baik pada sisi hilir maupun hulu. Namun, pada kondisi gempa MDE, analisis kestabilan lereng bendungan statik dengan kondisi gempa MDE, bendungan Way - Apu tidak memenuhi kriteria angka keamanan, baik pada sisi hilir maupun hulu. Sesuai dengan Pd T14-2004-A, pada kondisi yang tidak memenuhi angka keamanan perlu dilakukan analisis dinamik untuk menghitung deformasi yang terjadi pada saat keadaan gempa.

Berdasarkan hasil simulasi analisis kestabilan lereng bendungan dinamik, bendungan Way - Apu memenuhi kriteria angka keamanan, baik pada sisi hilir maupun hulu dalam kondisi setelah masa konstruksi, aliran *steady-state* dan *rapid drawdown*.

Daftar Pustaka

Badan Standarisasi Nasional, 2016. SNI 8064:2016. *Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Tipe Urugan*. BSN. Jakarta

Badan Standarisasi Nasional, 2002. *Tata Cara Desain Tubuh Bendungan Tipe Urugan*. BSN. Jakarta

Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah 2004. Pd-T 14-2004-A. *Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa*. Kementrian PUPR. Jakarta.

Sosrodarsono, Suyono dan Takeda Kensaku. 1977. *Bendungan Tipe Urugan Cetakan Keempat*. Pradnya Paramita. Jakarta

Ibrahim M.A. 2017. *Analisis Stabilitas Bendungan Urugan Tipe Urugan Zonal Inti Tegak dengan Perkuatan Timbunan terhadap Beban Gempa*. Universitas Sebelas Maret. Surakarta.

Aulawi N. 2018. *Analisis Stabilitas Statik dan Respon Dinamik Terhadap*

- Displacement Selama Gempa Pada Bendungan Urugan Zonal Inti Tegak. Universitas Sebelas Maret. Surakarta.
- Dewi R.K. 2018. *Analisis Stabilitas Statik dan Stabilitas Dinamik Menggunakan Parameter Safety Evaluation Earthquake (SEE) Pada Bendungan Urugan Zonal Inti Tegak*. Universitas Sebelas Maret. Surakarta.
- Hartono W.A. 2018. *Analisis Stabilitas Bendungan Urugan Zonal Inti Miring Dengan Metode Statik dan Dinamik Riwayat Waktu*. Universitas Sebelas Maret. Surakarta.
- Kanamori H. 1977. *Energy-Release In Great Earthquakes*. Journal of Geophysical Research. (<https://doi.org/10.1029/JB082i020p02981>. Diakses September 2022)
- Kramer, S.L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. PrenticeHall, New Jersey.
- Gutenberg, B., dan Richter, C.F. 1954. *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*. Princeton University Press, Princeton.
- Arabasz W. J. dan Robinson R. 1976 *Microseismicity and Geologic Structure In The Northern South Island, New Zealand*. New Zealand Journal of Geology and Geophysics. New Zealand.
- Gardner, J. K., & Knopoff, L. 1974. *Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?*. Bulletin of Seismological Society of America., 64, 1363-1367.
- Asrurifak M., Irsyam M., Budiono B., Triyoso W., and Anita Firmanti A., Indonesia Spectral Hazard Map at Ground Surface for Earthquake Resistance Building Design, The 5th Kyoto University Southeast Asia Forum, Conference of Earth and Space Science, Bandung 7-8 January 2010.
- Seed, H.B., Lee, K.L. and Idriss, I.M. 1969. *Analysis of Sheffield Dam Failure*. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 95, 1453-1490.
- Pangular, D., 1985, *Petunjuk Penyelidikan & Penanggulangan Gerakan Tanah, Pusat Penelitian dan Pengembangan Pengairan*. Balitbang Departemen Pekerjaan Umum.
- Pusat Studi Gempa Nasional. 2017. *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. N.p: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum.
- Puslitbang Sumber Daya Air, Kementrian Pekerjaan Umum. 2014. *Analisa Dinamik Bangunan Air*.
- Richart, F., Hall, J., & Woods, R. 1970. *Vibrations of Soils and Foundations*. Upper Saddle River: Prentice-Hall, Inc.
- USGS. Katalog Gempa. (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>. Diakses Agustus 2022).
- ANSS. Katalog Gempa. (<https://www.ncedc.org/anss/catalogsearch.html>. Diakses Agustus 2022).
- ISC. Katalog Gempa. (<http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/>. Diakses Agustus 2022).
- Edwina, D., & S. Novita. 2008. *Pemetaan Percepatan Tanah Maksimum dan Intensitas Seismik Kota Padang Panjang menggunakan Metode Kanai*. Jurnal Teknik Sipil Universitas Andalas, Vol. 2, No. 29, ISSN: 08548471.
- Ibrahim, G. & Subardjo. 2005. *Pengetahuan Seismologi*. Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika. Jakarta.
- Bowles, J. E., 1978, *Engineering Properties of Soils and Their Movement, 2nd edition*, McGraw-Hill Book

Company, New York.

Christady Hardiyatmo, 2007a. *Mekanika Tanah 1* Edisi Keempat. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.

Christady Hardiyatmo, 2007b. *Mekanika Tanah 2* Edisi Keempat. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.

Das, Braja M. 1983. *Advanced Soil Mechanics*. Washington, New York, London: Hemisphere Publishing Corporation.

Das, Braja M, dkk. 1993. *Mekanika Tanah Jilid 1* (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik), Jakarta: Erlangga.

Das, Braja M, dkk. 1994. *Mekanika Tanah Jilid 2* (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik), Jakarta: Erlangga.

Cornell, C.A. 1968. *Engineering Seismic Risk Analysis, Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 58, pp. 1583-1606.