

Evaluasi Kinerja Seismik Bendungan Lama Berdasarkan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia 2017, Studi Kasus Bendungan Saguling – Jawa Barat

Cepi Herdiyan Kurniawan^{1,*}, Paulus Pramono Rahadjo¹, Martin Wijaya¹

Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Khatolik Parahyangan, Bandung¹

Koresponden*, Email: cepiherdiyan@yahoo.com

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	27 Desember 2024	<i>Over the past two decades, Indonesia's earthquake source maps have undergone several revisions, with the most recent update published in 2017. This may affect the performance of infrastructure that has been in operation for a long time. This study aims to evaluate the seismic performance of the Saguling dam based on the 2017 Indonesia Earthquake Hazard and Source Map. An earthquake risk assessment based on the probability of an earthquake acceleration event within a certain return period (probabilistic) and considering the maximum earthquake potential (deterministic) was conducted to determine the earthquake source and peak ground acceleration (PGA) affecting the Saguling Dam site. The design parameters of the dam were determined using back analysis based on the vertical deformation recorded at the dam crest due to earthquakes during inundation. Furthermore, the seismic performance assessment of Saguling Dam was reviewed by performing dynamic analysis using 145-year (OBE), 10,000-year (MDE) and 84 percentiles return period earthquake loads. The behavior of pore water pressure, shear strain, horizontal and vertical deformation during earthquakes was studied in this research. The results show that Saguling Dam is still considered safe against the largest earthquake that may occur.</i>
Diperbaiki	08 April 2025	
Disetujui	30 September 2025	

Keywords: earth dam, seismic performance, dynamic analysis, dam behavior.

Abstrak

Dalam kurun waktu dua dekade terakhir, peta sumber gempa Indonesia telah mengalami sejumlah revisi, dimana pembaruan terkini dipublikasikan pada tahun 2017. Hal ini dapat mempengaruhi kinerja infrastruktur yang telah lama beroperasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja seismik bendungan Saguling berdasarkan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia 2017. Penilaian risiko gempa berdasarkan kemungkinan kejadian percepatan gempa dalam periode ulang tertentu (probabilistik) dan juga pertimbangan potensi gempa maksimum (deterministik) dilakukan untuk menentukan sumber gempa dan percepatan tanah puncak (PGA) yang mempengaruhi lokasi Bendungan Saguling. Parameter desain bendungan ditentukan menggunakan analisis balik berdasarkan deformasi vertikal yang terekam di puncak bendungan akibat gempa bumi selama penggenangan. Selanjutnya, penilaian kinerja seismik Bendungan Saguling ditinjau dengan melakukan analisis dinamik menggunakan beban gempa kala ulang 145 tahun (OBE), 10.000 tahun (MDE) dan 84 persentil. Perilaku tekanan air pori, regangan geser, deformasi horisontal dan vertikal selama gempa bumi dipelajari dalam penelitian ini. Hasil penelitian menunjukkan bendungan Saguling dinilai masih aman terhadap gempa terbesar yang mungkin terjadi.

Kata kunci: bendungan urugan, kinerja sesimik, analisa dinamik, perilaku bendungan.

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara yang memiliki tingkat kegempaan tinggi. Hal ini karena Indonesia terletak di zona tektonik yang kompleks di wilayah tenggara lempeng Eurasia. Tingginya aktivitas seismik dan vulkanik di wilayah ini merupakan dampak langsung dari proses tektonik yang terjadi [1].

Seiring dengan berkembangnya penemuan sumber gempa baru, peta gempa Indonesia telah melalui beberapa kali pembaharuan. Diawali dari Peta Zona Gempa Indonesia tahun 2004 [2], Peta Gempa Indonesia tahun 2010 [3], dan terakhir Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017 [1].

Keberadaan gempa yang sering terjadi di Indonesia menjadikan mitigasi dan penanganan dampak gempa sebagai salah satu fokus utama dalam pengembangan berbagai jenis infrastruktur penting, termasuk dalam pembangunan bendungan. Tidak hanya pada perencanaan pembangunan bendungan baru, namun keberadaan bendungan lama juga perlu diperiksa kembali kinerjanya terhadap penemuan sumber-sumber gempa baru. Sehingga evaluasi kinerja perlu dilakukan untuk meningkatkan ketahanan bendungan terhadap risiko gempa.

Pada studi ini dilakukan evaluasi kinerja bendungan lama terhadap risiko gempa bumi berdasarkan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Bumi Indonesia tahun 2017. Bendungan

Saguling yang menjadi fokus penelitian merupakan salah satu bendungan tua di Jawa Barat.

Analisis risiko gempa dilakukan pada radius 500 km dari lokasi bendungan. Sumber gempa terbaru digunakan sesuai dengan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017. Hasil motion sintetis analisa risiko gempa digunakan dalam analisa dinamik bendungan menggunakan metode beda hingga (*Finite Different Method*). Analisa dinamik dengan time history lebih dipilih dari pada analisa pseudo-static ataupun simplified deformasi Maksdisi & Seed karena memberikan prediksi yang lebih realistis. Meskipun analisa pseudo-static ataupun simplified deformasi Maksdisi & Seed seringkali dianggap memberikan deformasi yang konservatif [4], [5]. Namun penelitian lainnya menunjukkan hal tersebut tidak selalu konsisten [6], [7].

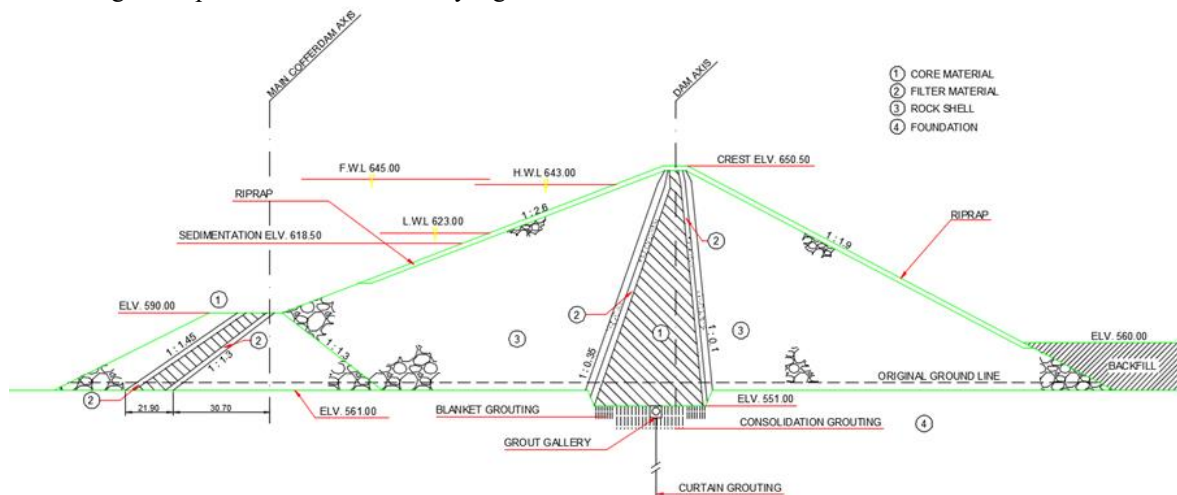
Analisa balik (*back analysis*) terhadap parameter timbunan bendungan yang disesuaikan dengan kejadian gempa saat penggenangan dilakukan karena keterbatasan informasi mengenai parameter timbunan yang telah

terbangun. Selanjutnya, penilaian kinerja bendungan diperiksa terhadap perilaku tekanan air pori, regangan geser, deformasi horizontal dan vertikal pada bendungan.

2. Metodologi

2.1 Lokasi Bendungan Saguling

Bendungan Saguling merupakan bendungan PLTA penting yang terletak di Jawa Barat, Indonesia. Bendungan ini terletak di Sungai Citarum, sekitar 40 km barat daya Bandung, ibu kota Jawa Barat. Bendungan Saguling dibangun sekitar tahun 1983 hingga tahun 1985. Bendungan ini merupakan bendungan tipe urugan batu (rockfill) dengan inti kedap, memiliki tinggi 99.00 m, lebar puncak 10.00 m dan volume tampungan air waduk sekitar \pm 875 juta m³. Elevasi puncak bendungan Saguling berada pada El. 650.50 m dan elevasi muka air banjir berada pada El. 645.00 m seperti terlihat pada **Gambar 1**. Bendungan Saguling dibangun diatas formasi Breksi Tufaan, Lava, Batupasir (Pb).



Gambar 1. Potongan Melintang Bendungan Saguling [22]

Berdasarkan laporan pengawasan saat pembangunan, disekitar wilayah Bendungan Saguling tercatat beberapa gempa terjadi saat sebelum dan setelah penggenangan. Gempa maksimum setelah penggenangan tercatat pada 20 Oktober 1985 dengan magnitudo (M) 3.3 dan jarak (R) 20 km. Deformasi vertikal tercatat sekitar 30-35 cm pada puncak bendungan akibat gempa tersebut.

2.2 Analisa Risiko Gempa (*Seismic Hazard Analysis*)

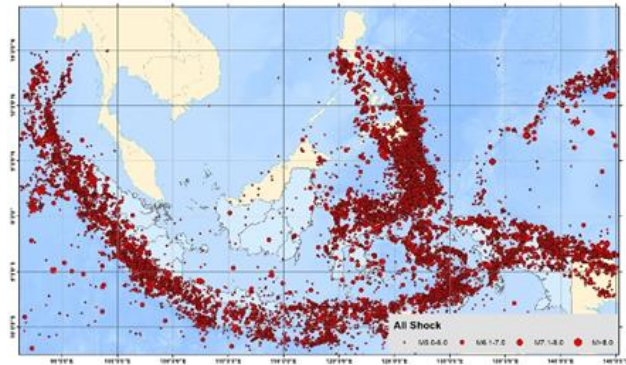
Analisis risiko gempa dilakukan untuk memberikan penilaian kuantitatif terhadap percepatan gempa di suatu daerah. Proses ini menghubungkan kondisi sumber gempa dengan kejadian gempa untuk menghasilkan parameter desain gempa yang digunakan dalam evaluasi kinerja struktur.

Dalam melakukan analisis risiko gempa, terdapat dua pendekatan utama, yaitu metode analisa risiko gempa secara probabilistik (PSHA) dan metode analisa risiko gempa secara deterministik (DSHA). Pada prosedur probabilistik, dilakukan pengkajian mengenai probabilitas percepatan gempa yang terjadi, sama dengan atau melebihi angka tertentu dalam suatu periode ulang tertentu. Sementara itu, penentuan percepatan gempa pada metode deterministik dilakukan sesuai dengan gempa maksimum yang mungkin terjadi (*maximum credible earthquake*) akibat dari suatu sumber gempa.

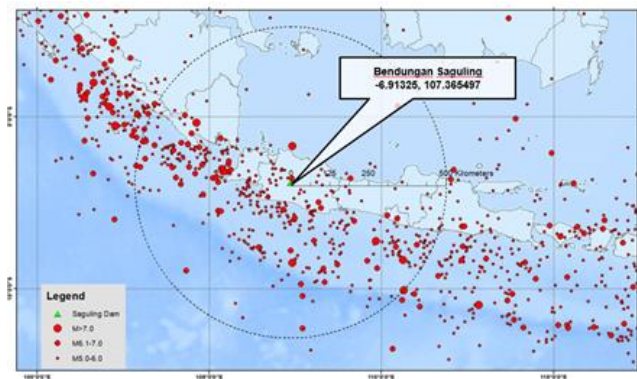
Analisis risiko gempa mencakup beberapa tahapan, yaitu pengumpulan dan pengolahan data gempa, identifikasi sumber gempa, penentuan fungsi attenuasi, analisa

probabilistik/deterministik, serta penentuan input *ground motion*.

Pada tahap awal, data gempa dikumpulkan sesuai batas wilayah Indonesia yang terletak antara 6° LU - 11° LS dan 95° BT - 141° BT, dengan rentang waktu dari tahun 1900 hingga 2023. Data yang digunakan memiliki batas momen magnitudo terkecil $M_w = 5.0$ dan kedalaman maksimal 300 km, yang diperoleh dari berbagai katalog gempa, seperti BMKG, USGS, ISC, PDE, dan NOAA seperti terlihat pada **Gambar 2** dan **3**. Kumpulan katalog tersebut mencatat gempa dengan skala magnitudo yang bervariasi, memiliki gempa utama (*main shock*) dan gempa susulan (*aftershock*). Oleh karena itu, data gempa perlu dikoreksi dan diolah terlebih dahulu sebelum digunakan dalam analisis. Pemilahan antara *main shock* dan *after shock* (analisa *dependency*) dilakukan berdasarkan metode yang diperkenalkan oleh Gardner dan Knopoff (1974). Analisa *dependency* dilakukan terhadap 19.430 data kejadian gempa dan menghasilkan 6.516 data kejadian gempa utama (*mainshock*).



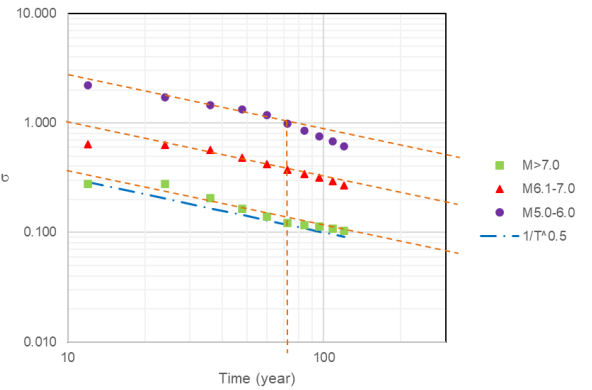
Gambar 2. Distribusi Kejadian Gempa Indonesia 1900 – 2023



Gambar 3. Sebaran Gempa Utama Dalam Jangkauan 500 Km Disekitar Bendungan Saguling

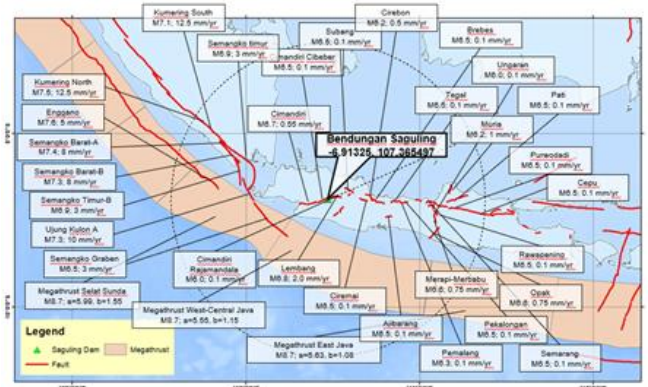
Menurut metode yang dikembangkan oleh Stepp [8], [9], kelengkapan data dalam periode waktu tertentu dianalisis melalui grafik yang menunjukkan perubahan gradien kecenderungan data. Ketidaklengkapan data ditunjukkan saat

standar deviasi berubah menjadi lebih curam. Ketidaklengkapan data gempa dapat mengakibatkan hasil analisis risiko gempa menjadi *overestimate* ataupun *underestimate*. Hasil analisis kelengkapan data menunjukkan, data gempa tersedia secara lengkap 72 tahun pada rentang magnitudo $5.0 < M_w \leq 6.0$. Sementara itu, pada rentang magnitudo $6.0 < M_w \leq 7.0$, data gempa tersedia lengkap 84 tahun, dan untuk magnitudo $M_w > 7.0$, data gempa tersedia lengkap 96 tahun seperti terlihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Analisa Kelengkapan Data (*Completeness*)

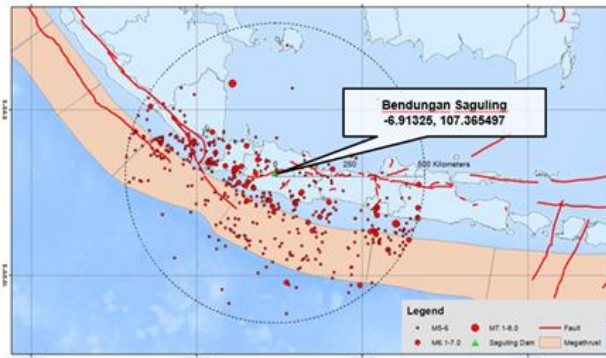
Selanjutnya dalam analisis risiko gempa, sumber gempa seperti yg terlihat pada **Gambar 5** yang digunakan meliputi gempa *shallow crustal*, *megathrust*, dan *background*. Sumber gempa *shallow crustal* dan *megathrust* difokuskan pada area Pulau Jawa dan Sumatera bagian Selatan sesuai Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia 2017. Terdapat 30 sumber gempa *shallow crustal* dan 3 sumber gempa *megathrust* yang masuk dalam radius 500 km dari bendungan Saguling. Sementara itu, sumber gempa *background* digunakan berdasarkan kejadian gempa utama disekitar radius 500 km bendungan Saguling.



Gambar 5. Sumber Gempa Sekitar Pulau Jawa Dan Sumatera Bagian Selatan

Gempa *background* ditentukan dengan mengeliminasi gempa yang memiliki magnitudo $M_w \geq 6.5$ di wilayah

pengaruh *megathrust* dan *shallow crustal* dalam radius 15 km. Setelah itu, sumber gempa *background* dikelompokkan berdasarkan kedalaman seperti terlihat pada **Gambar 6**, yaitu: kedalaman 0.00 hingga 50.00 km (*Shallow Background*), kedalaman 50.00 hingga 100.00 km (*Deep Background 1*), kedalaman 100.00 hingga 150.00 km (*Deep Background 2*), kedalaman 150.00 hingga 200.00 km (*Deep Background 3*), dan kedalaman 200 – 300 km (*Deep Background 4*).



Gambar 6. Sumber Gempa *Background* Disekitar Radius 500 Km Bendungan Saguling

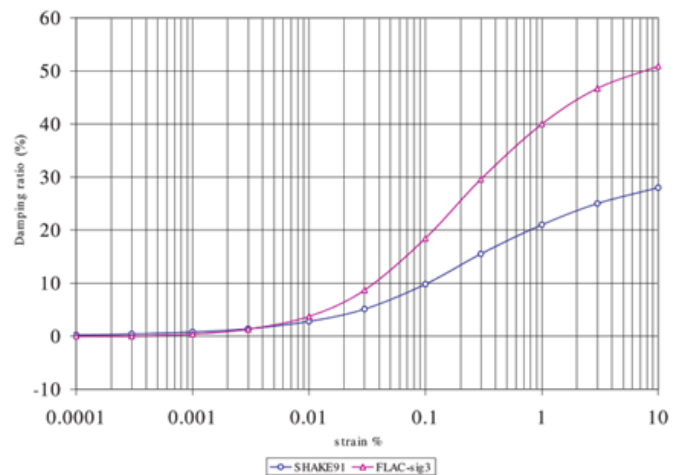
Sebelum melakukan analisis resiko gempa, pemilihan fungsi atenuasi dilakukan terlebih dahulu. Fungsi atenuasi merupakan suatu persamaan yang mengaitkan parameter pergerakan tanah dengan parameter seismologi gempa, seperti magnitudo, jarak, dan tipe sumber gempa [10]. Penentuan fungsi atenuasi mengacu pada kesesuaian kondisi tektonik wilayah dengan lokasi asal pengembangan fungsi tersebut. Fungsi atenuasi yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Sumber gempa *shallow crustal* mencakup gempa yang berasal dari sesar/patahan serta gempa dangkal; [11], [12], [13].
2. Sumber gempa subduksi permukaan (*megathrust*) digunakan untuk menggambarkan gempa yang berasal dari zona subduksi; Geomatrix subduction [14], [15], [16]
3. Sumber gempa benioff (*deep intraslab*) digunakan untuk menggambarkan gempa yang terjadi di dalam lempeng subduksi; [15], Geomatrix slab seismicity rock [14], [15].

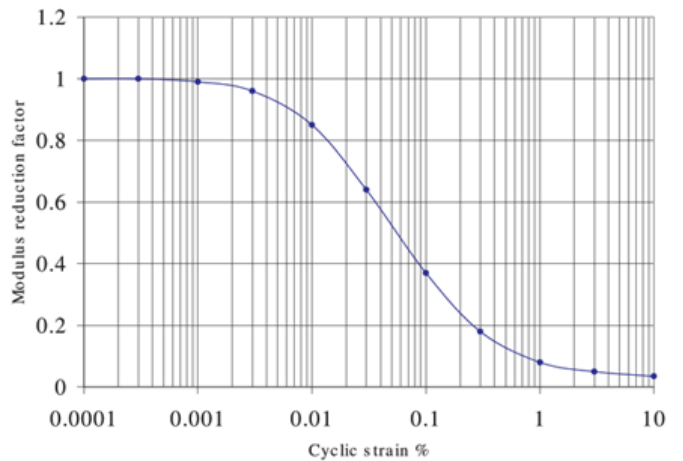
2.3 Analisa Balik (Back Analysis) Parameter Bendungan

Bendungan Saguling merupakan bendungan tipe urugan batu (*rockfill*) dengan tinggi 99 m dan lebar puncak 10 m. Zona inti bendungan merupakan material kedap air dan zona filter merupakan material *semi-permeable*. Sementara itu, pondasi merupakan batu breksi. Pembagian zona bendungan Saguling dapat dilihat pada **Gambar 1**.

Periode natural struktur dihitung berdasarkan persamaan Gazetas, 1987 [20] sebesar 0.4 s. Muka air waduk dalam analisis ini dimodelkan dengan kondisi aliran air langgeng. Model konstitutif yang digunakan adalah kombinasi model Mohr-Coulomb dan Finn-Byrne agar perilaku tekanan air pori pada zona inti, filter, dan rockfill dapat diamati saat gempa. Dalam pemodelan analisis dinamik menggunakan metode beda hingga, redaman material yang digunakan sesuai dengan kurva damping vs regangan Seed & Idriss seperti terlihat pada **Gambar 7** dan **8**.

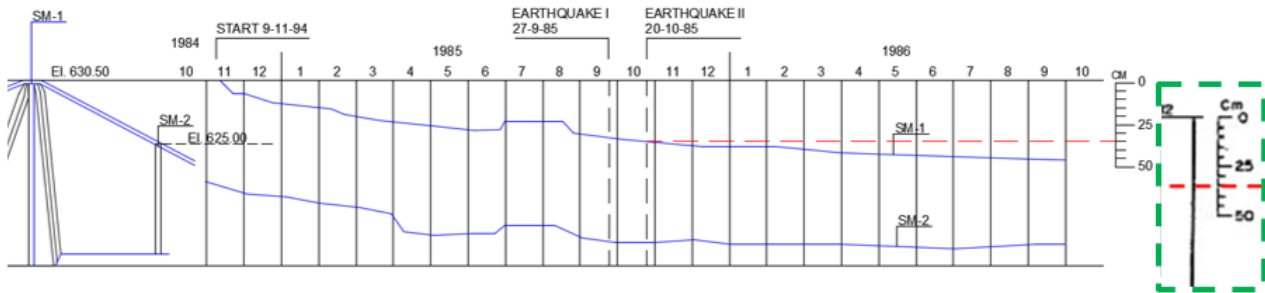


Gambar 7. Kurva Damping vs Regangan oleh Seed & Idriss, 1970 [21]



Gambar 8. Kurva Reduksi Modulus oleh Seed & Idriss, 1970 [21]

Parameter disain timbunan bendungan ditentukan berdasarkan *back analysis* yang dilakukan terhadap bendungan Saguling dengan menggunakan kejadian gempa 20 Oktober 1985 dengan magnitudo (M) 3.3 dan jarak (R) 20 km. Berdasarkan hasil monitoring seperti terlihat pada **Gambar 9**, penurunan pada puncak sekitar 30 - 35 cm setelah kejadian gempa tersebut.

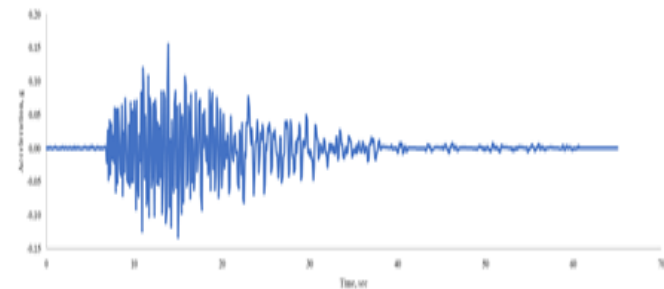


Gambar 9. Monitoring Penurunan Bendungan Saguling [22]

Data pencatatan akselerometer saat terjadinya gempa tidak ditemukan, maka *input ground motion* diambil dari website *PEER Ground Motion Database (berkeley.edu)* dengan kriteria magnitude dan jarak yang sesuai kejadian gempa 20 Oktober 1985 seperti terlihat pada **Tabel 1** dan **Gambar 10**.

Tabel 1. Input Motion Analisa Balik

No	Earthquake	Station	M, Mw	R (km)	V _{S30} (m/s)
1	51203888, 2008	Taylor	3.50	23.40	422.00

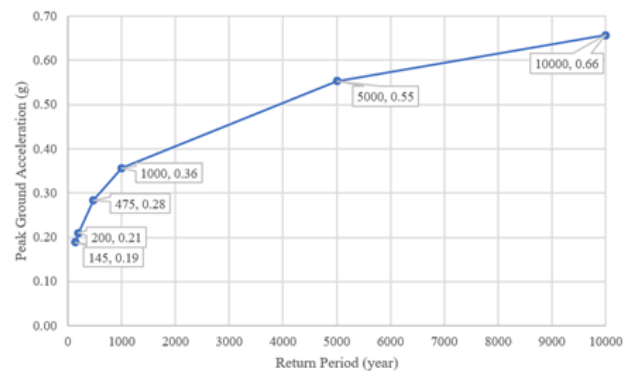


Gambar 10. Input Ground Motion Analisa Balik

3. Hasil dan Pembahasan

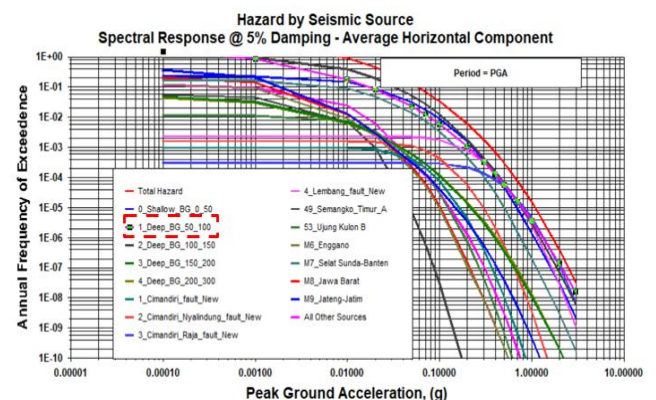
Berdasarkan hasil analisis bahaya gempa probabilistik (PSHA) yang dilakukan di lokasi Bendungan Saguling, Kabupaten Bandung Barat, Provinsi Jawa Barat, dengan koordinat -6.9133° , 107.366° , diperoleh nilai rata-rata percepatan tanah puncak (PGA) yang dihasilkan dari semua sumber gempa disekitar lokasi studi untuk 50%, 39.5% 19%, 10%, 2%, dan 1% kemungkinan terlampaui (*Probability Of Exceedence*) dalam 100 tahun umur rencana bangunan atau sesuai dengan 145, 200, 475, 1000, 5000, dan 10.000 tahun periode ulang berturut-turut sebesar 0.19 g, 0.21g, 0.28 g, 0.36 g, 0.55g dan 0.66 g (**Gambar 11**). Nilai PGA diverifikasi dengan mengacu pada Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017. Pada lokasi Bendungan Saguling, nilai PGA yang tercatat untuk periode ulang 200 tahun menunjukkan rentang antara 0.20 hingga 0.25 g.

SHA Exposure Curve



Gambar 11. Kurva *Seismic Hazard Exposure* Berbagai Periode Ulang Untuk Lokasi Bendungan Saguling

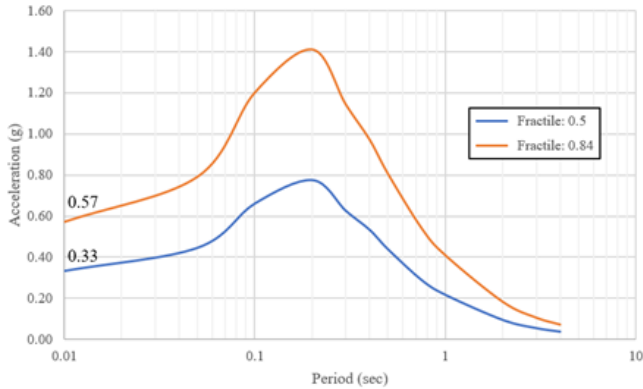
Hasil PSHA bendungan Saguling pada periode ulang yang sama menunjukkan nilai PGA 0.21 g. Kondisi ini menunjukan hasil analisa risiko gempa telah terverifikasi. Kurva kontribusi bahaya gempa menunjukkan bahwa sumber gempa dengan kedalaman *deep background* 1 (50 – 100 km) memberikan pengaruh terbesar terhadap jumlah kejadian gempa tahunan pada bendungan Saguling seperti terlihat pada **Gambar 12**.



Gambar 12. Kurva *hazard* akibat berbagai Sumber Gempa dilokasi Bendungan Saguling

Sementara itu, menurut pendekatan analisis bahaya gempa deterministik (DSHA), patahan Cimandiri Rajaman-

dala dengan magnitudo $M_w = 6,6$ dan jarak $R = 5,11$ km memberikan kontribusi terbesar terhadap pada lokasi Bendungan Saguling. Nilai percepatan maksimum pada batuan dasar (PGA) pada 50 persentil dan 84 persentil masing-masing sebesar 0,33 g dan 0,57 g seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 13**.



Gambar 13. Hasil DSHA di Lokasi Bendungan Saguling

Tahapan akhir dalam analisis resiko gempa adalah penentuan input ground motion. Penentuan input ground motion

dilakukan berdasarkan kriteria gempa sesuai bendungan Saguling yang termasuk pada kelas risiko IV (*Extrim/High*), berdasarkan Buletin ICOLD No. 72 [17], kriteria gempa OBE menggunakan periode ulang 145 tahun dengan umur rencana bangunan 100 tahun. Sedangkan untuk kriteria *Safety Evaluation Earthquake* (SEE) mengacu kepada 84th persentil dari hasil metode deterministik (DSHA) dan juga *Maximum Design Earthquake* (MDE) mengacu pada hasil PSHA dengan periode ulang 10,000 tahun (**Tabel 2**).

Ground motion sintetik pada batuan dasar ditentukan berdasarkan pemilihan 3 s/d 7 ground motion pada ASCE 7-10, 2010 [18] yang sesuai dengan hasil analisa deagregasi dan target spectra melalui proses penskalaan *spectra matching*. Dalam studi ini, dipilih 3 ground motion untuk analisis pencocokan spektral (*spectral matching*) karena penggunaan kurang dari 7 data rekaman menghasilkan nilai deformasi maksimal dan deformasi permanen yang lebih konservatif [19].

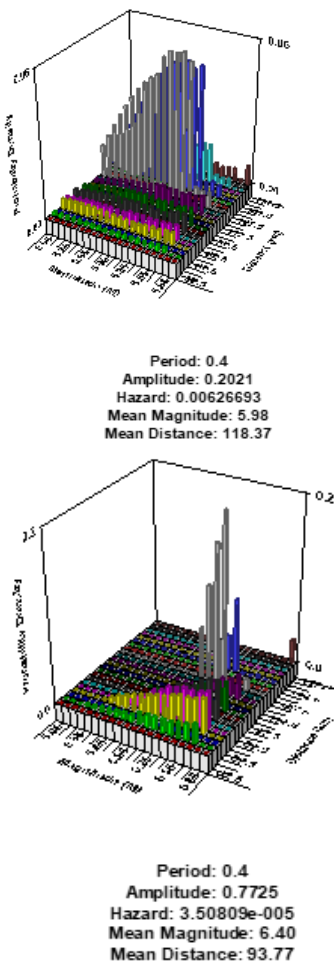
Tabel 2. Kriteria Beban Gempa Disain Bendungan ICOLD, 2010 [17]

Criteria Element	Evaluation Criteria		
Dam Potential Impact Category	Extrime/High	Moderate/medium	Low
Evaluation Earthquake	SEE	SEE	SEE
Earthquake Definition	84 th percentile level Controlling Maximum Earthquake (CME). Need not exceed Controlling Earthquake scenario (CES) for 10.000 year motion	50 th - 84 th percentile level Controlling Maximum Earthquake (CME). Need not exceed Controlling Earthquake scenario (CES) for 3.000 year motion	50 th percentile level Controlling Maximum Earthquake (CME). Need not exceed Controlling Earthquake scenario (CES) for 1.000 year motion
OBE	Usually have a mean AEP of about 1/145		

Target spectra menggunakan *Uniform Hazard Spectra* hasil dari *probabilistic seismic hazard analysis* (PSHA). Hasil analisis deagregasi menunjukkan kontribusi nilai rata-rata jarak terdekat (R) dan *magnitude* (M) terbesar dari sumber gempa pada lokasi studi. Nilai M dan R seperti terlihat pada **Tabel 3** digunakan sebagai referensi untuk mencari input gerakan tanah yang memiliki karakteristik serupa seperti terlihat pada **Gambar 14**, selanjutnya input gerakan tanah terpilih digunakan dalam analisis pencocokan spektral.

Tabel 3. Kriteria Magnitude (M) dan Jarak (R) masing-masing Gempa

Gempa	Periode 0.4 sec	
	Mcontrolling	Rcontrolling
	Mw	km
OBE 145 tahun	5,98	118,37
MDE 10,000 tahun	6,40	93,77
84 th persentil	6,60	5,11

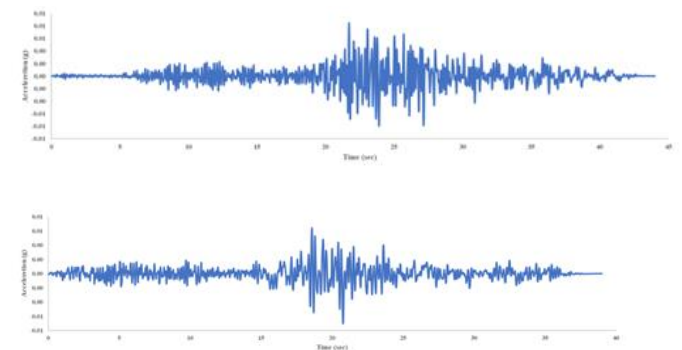
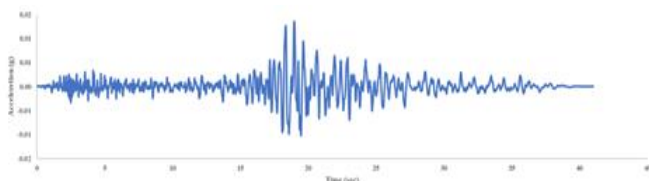


Gambar 14. Kurva Deagregasi

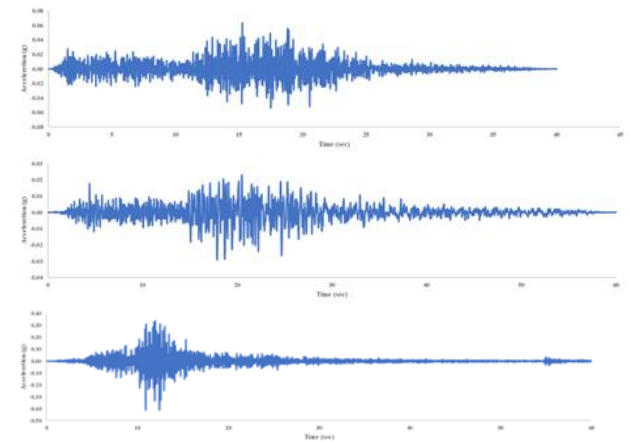
Input gerakan tanah yang akan digunakan dalam analisis pencocokan spektral (*spectral matching*) diambil dari basis data website *Pacific Earthquake Engineering Research Centre* (PEER) dengan karakteristik sebagai berikut:

- $5,90 \leq Mw \leq 6,60$
- $5,00 \leq R \text{ (km)} \leq 120$
- $Vs \text{ } 30 > 400 \text{ m/s}$

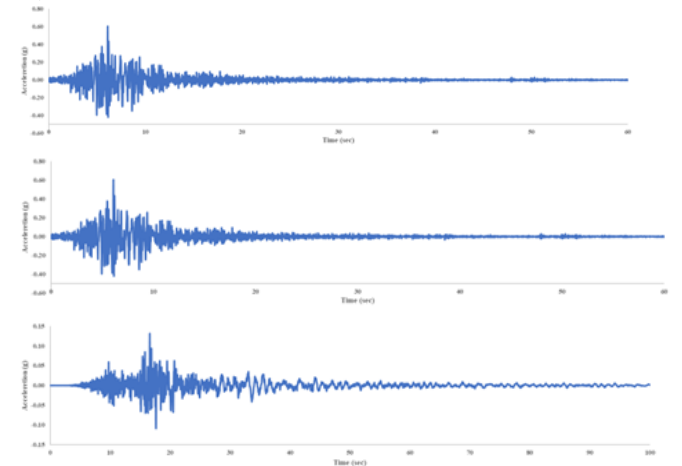
Input gerakan tanah hasil dari *spectral matching* untuk kriteria gempa OBE, MDE dan 84th persentil DSHA ditunjukkan pada **Gambar 15** hingga **Gambar 17**. Input gerakan tanah tersebut akan digunakan dalam penilaian kinerja seismik bendungan bendungan Saguling dengan analisa dinamik.



Gambar 15. Gerakan Tanah Sintetik Untuk Gempa OBE 145 tahun

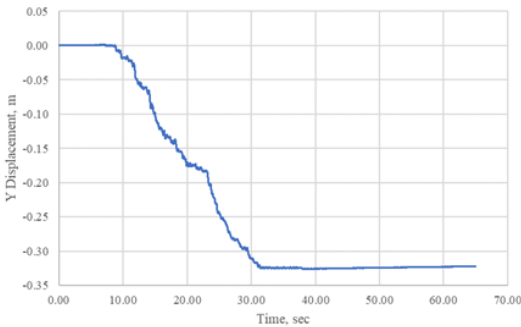


Gambar 16. Gerakan Tanah Sintetik Untuk Gempa MDE 10,000 tahun

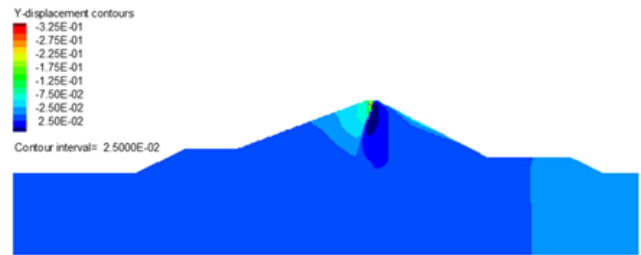


Gambar 17. Gerakan Tanah Sintetik Untuk Gempa 84th Persentil DSHA

Sementara itu, hasil analisa balik parameter bendungan Saguling menunjukkan deformasi vertikal sebesar 32,30 cm seperti terlihat pada **Gambar 18** dan **19**. besarnya penurunan/deformasi vertikal ini dinilai sudah mendekati hasil monitoring 30,00 – 35,00 cm. Sehingga parameter bendungan dapat digunakan.



Gambar 18. Penurunan/deformasi vertikal puncak bendungan hasil analisa balik sebesar 32,30 cm



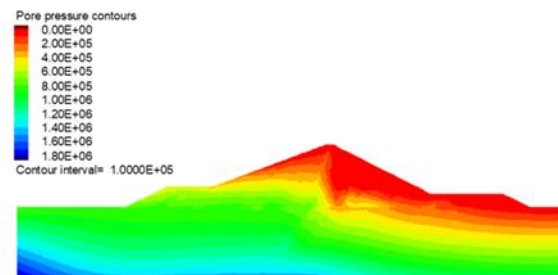
Gambar 19. Penurunan puncak bendungan hasil analisa balik

Adapun parameter bendungan Saguling hasil analisa balik terhadap gempa 20 Oktober 1985 dengan magnitudo (M) 3.3 dan jarak (R) 20 km terlihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Parameter hasil analisa balik

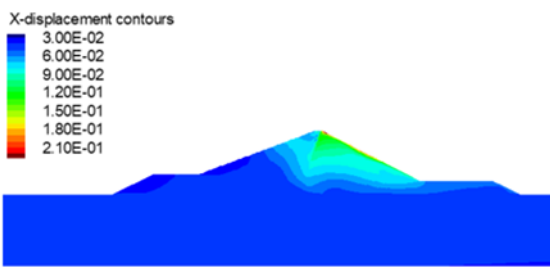
Dam Zones	Density kg/m ³	Gmax Mpa	K Mpa	c' kPa	f' (°)	Finn-Byrne	
						c ₁	c ₂
Core	1800	80	133	1	26	0,062109	3,22015
Filter	1900	161	215	1	36	0,062109	3,22015
Rockfill	2100	425	390	1	37	0,062109	3,22015
Foundation	2200	2300	2110	150	36	-	-

Selanjutnya, analisis dinamik bendungan Saguling menggunakan metode beda hingga dengan kriteria beban gempa OBE 145 tahun, MDE 10.000 tahun dan gempa 84th persentil dilakukan untuk menganalisis kondisi bendungan terhadap tekanan air pori, deformasi horizontal dan vertikal, serta hubungan tegangan dan regangan selama terjadinya gempa.

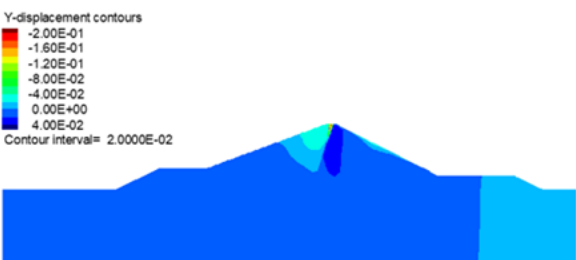


(c)

Gambar 20. Kontur Bendungan Saguling setelah mengalami guncangan Gempa: (a) Deformasi Horizontal, (b) Deformasi Vertikal, (c) Tekanan Air Pori



(a)



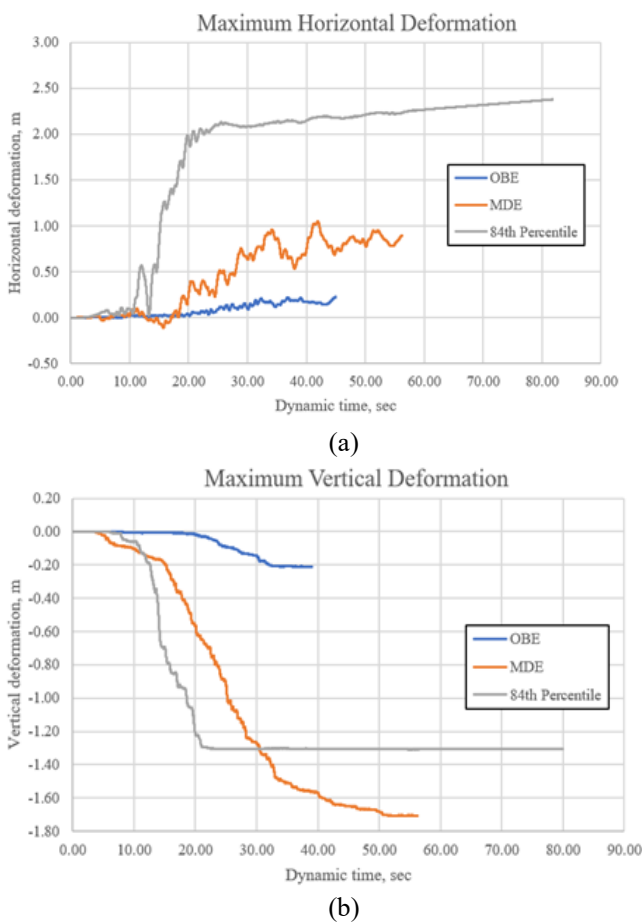
(b)

Pada **Gambar 20**, hasil analisis dinamik menunjukkan deformasi horizontal maksimum pada puncak bendungan Saguling saat diguncang gempa (*during earthquake*) untuk kriteria gempa OBE, MDE dan 84th persentil masing-masing adalah 22,40 cm, 105,00 cm dan 237,00 cm.

Sementara deformasi vertikal setelah gempa (*post-earthquake*) pada puncak bendungan Saguling untuk kriteria gempa OBE, MDE dan 84th persentil masing-masing adalah 21,00 cm, 170,00 cm dan 130,40 cm. Adapun rangkuman deformasi vertikal dan horizontal masing-masing kriteria gempa ditunjukkan pada **Tabel 5** dan **Gambar 21**.

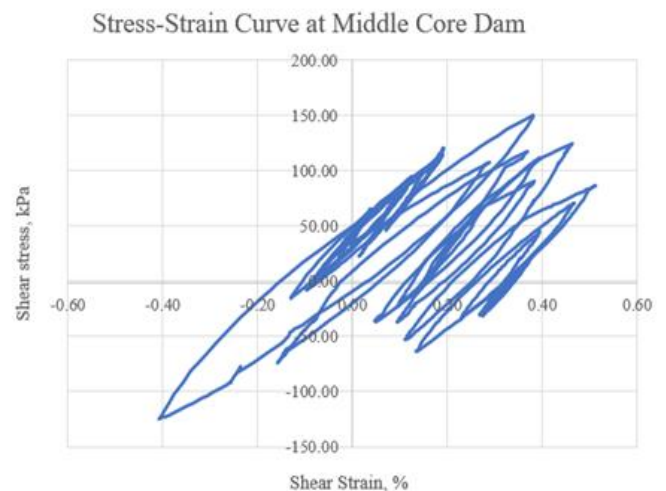
Tabel 5. Deformasi vertikal dan horizontal pada puncak bendungan Saguling setelah diguncang gempa (*post-earthquake*)

No.	Earthquake Criteria	Event Name	Station	Deformation (cm)	
				Vertical	Horizontal
1.	OBE	Chi-chi, Taiwan-02, 1999	TAP034	20,95	22,40
2.		Chi-chi, Taiwan-02, 1999	CHY061	21,00	22,20
3.		Chi-chi, Taiwan-03, 1999	KAU078	20,60	21,00
4.	MDE	BigBear-01, 1992	Puetra La Cruz	170,00	105,00
5.		BigBear-01, 1992	PB, Pallet Creek	114,50	51,00
6.		Tottori Japan, 2000	HRS001	125,00	75,50
7.	84 th percentile	Tottori Japan, 2000	TTR009	130,00	237,00
8.		Tottori Japan, 2000	SMNH01	130,00	226,00
9.		Tottori Japan, 2000	TTR007	130,40	235,50

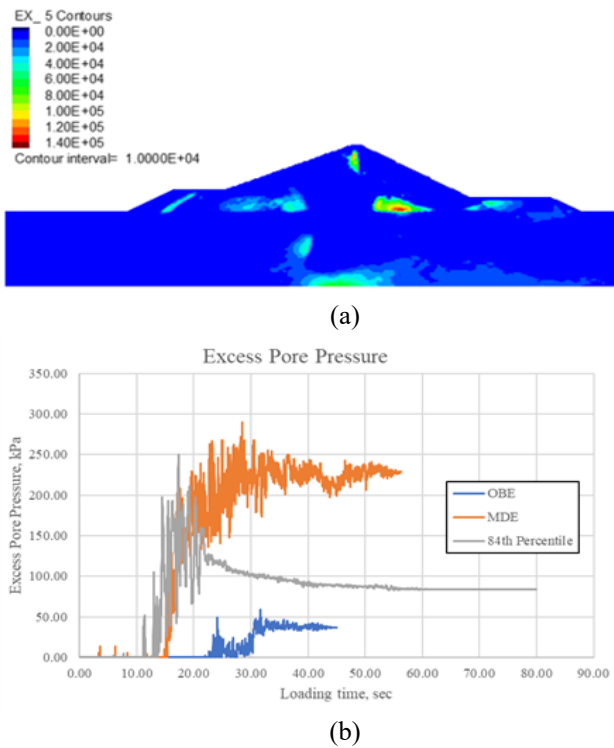
**Gambar 21.** Deformasi maksimum pada puncak bendungan Saguling (a) arah horizontal, (b) arah vertikal

Hubungan antara tegangan dan regangan geser pada bagian tengah inti yang diperoleh dari pemodelan menunjukkan regangan maksimum sebesar 0,512% dengan tegangan geser maksimum sebesar 150 kPa seperti ditunjukkan **Gambar 22**. Mengacu pada kriteria yang ditetapkan oleh Ishihara (1996), bagian tengah inti berada pada kondisi regangan besar. Selain itu, berdasarkan hasil hubungan tegangan-regangan,

kemiringan kurva (*shear modulus*) semakin landai seiring dengan meningkatnya regangan.

**Gambar 22.** Kurva tegangan-regangan geser pada tengah inti bendungan Saguling

Berdasarkan persyaratan deformasi bendungan urugan, deformasi akibat gempa MDE disyaratkan tidak melebihi 50% tinggi jagaan. Hasil analisis dinamik dengan gempa MDE 10.000 tahun, menunjukkan prediksi deformasi vertikal maksimum setelah gempa (*post-earthquake*) pada puncak bendungan sekitar 170.00 cm lihat **Gambar 23**. Nilai tersebut masih lebih kecil daripada 50% tinggi jagaan bendungan Saguling yaitu 275 cm. Sementara deformasi horizontal maksimum diprediksi pada gempa 84th persentil sebesar 237 cm. Nilai prediksi deformasi horizontal tersebut masih lebih kecil dari tebal zona *core* 5,00 m dan zona *filter* 4,50 m. Hal ini sesuai dengan syarat deformasi horizontal tidak melebihi tebal zona *core* dan zona *filter* atau kurang dari 3-4 m (Jitno & Davidson, 2010)[23]. Sehingga bendungan saguling masih dapat dinilai aman terhadap gempa terbesar yang mungkin terjadi.



Gambar 23. (a) Kontur ekses tekanan air pori setelah gempa, (b) *Excess pore pressure* setelah diguncang gempa

Berdasarkan klasifikasi kerusakan yang mungkin terjadi pada bendungan Saguling menurut Pells & Fell, 2003 [24] merupakan kelas nomor 2 (**Tabel 6**), kategori kerusakan sedang (*moderate*) dengan penurunan maksimum puncak bendungan 0,47 %.

Tabel 6. Kelas kerusakan bendungan berdasarkan persentase penurunan maksimum

Damage Class		Maximum Crest Settlement
Number	Description	(%)
0	No or slight	0.03
1	Minor	0,03 – 0,20
2	Moderate	0,20 – 0,50
3	Major	0,50 – 1,50
4	Severe	1,50 – 5,00
5	Collapse	>5,00

4. Simpulan

Berdasarkan hasil analisis risiko gempa dan analisis dinamik pada Bendungan Saguling menggunakan metode beda hingga yang telah dilakukan, sehingga dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Hasil analisis resiko bendungan menunjukkan nilai Peak Ground Accelerations (PGA) rata-rata yang dihasilkan *Probability of Exceedence* dalam 100 tahun umur rencana bangunan atau sesuai dengan 145, 200, 475,

- 1000, 5000, dan 10.000 tahun periode ulang berturut-turut sebesar 0,19 g, 0,21g, 0,28 g, 0,36 g, 0,55g dan 0,66 g.
2. Nilai PGA hasil analisis risiko bendungan diverifikasi dengan nilai PGA dari Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017. Peta tersebut menunjukkan rentang nilai 0,20 – 0,25 g untuk periode ulang 200 tahun, sementara hasil PSHA untuk Bendungan Saguling pada periode ulang yang sama menunjukkan nilai PGA sebesar 0,21 g.
3. Kurva kontribusi bahaya gempa menunjukkan bahwa sumber gempa *deep background* 1 (50 – 100 km) memberikan kontribusi terbesar
4. Pendekatan analisis deterministik (DSHA) menunjukan bahwa patahan Cimandiri Rajamandala dengan magnitudo Mw = 6,6 dan jarak R = 5,11 km memberikan kontribusi terbesar terhadap pada lokasi Bendungan Saguling. Nilai percepatan maksimum pada batuan dasar (PGA) pada 50 persentil dan 84 persentil masing-masing sebesar 0,33 g dan 0,57 g.
5. Hasil analisa faktor risiko bendungan menunjukan Bendungan Saguling termasuk kedalam kelas risiko IV (*Extrim/High*).
6. Berdasarkan Buletin ICOLD No. 72, 2010 (*revised*) kriteria gempa OBE menggunakan periode ulang 145 tahun. Sedangkan untuk kriteria *Safety Evaluation Earthquake* (SEE) mengacu kepada 84th persentil dari hasil metode deterministik (DSHA) dan juga *Maximum Design Earthquake* (MDE) mengacu pada hasil PSHA dengan periode ulang 10.000 tahun.
7. Hasil analisis dinamik menunjukan deformasi horizontal maksimum pada puncak bendungan Saguling saat diguncang gempa (*during earthquake*) untuk kriteria gempa OBE, MDE dan 84th persentil masing-masing adalah 22,40 cm, 105,00 cm dan 237,00 cm.
8. Deformasi vertikal maksimum setelah gempa (*post-earthquake*) pada puncak bendungan Saguling untuk kriteria gempa OBE, MDE dan 84th persentil masing-masing adalah 21,00 cm, 170,00 cm dan 130,40 cm.
9. Hubungan antara tegangan dan regangan geser pada bagian tengah inti yang diperoleh dari pemodelan menunjukkan regangan maksimum sebesar 0,512% dengan tegangan geser maksimum sebesar 150 kPa.
10. Hasil analisis dinamik dengan gempa MDE 10.000 tahun, menunjukkan prediksi deformasi vertikal maksimum setelah gempa (*post-earthquake*) pada puncak bendungan sekitar 170,00 cm. Prediksi deformasi dinilai masih masuk dalam persyaratan

deformasi bendungan karena lebih kecil daripada 50% tinggi jagaan bendungan Saguling yaitu 275 cm.

11. Deformasi horizontal maksimum diprediksi pada gempa 84th persentil sebesar 237 cm. Nilai prediksi deformasi horizontal tersebut masih lebih kecil dari tebal zona *core* 5,00 m dan zona *filter* 4,50 m. Hal ini sesuai dengan syarat deformasi horizontal tidak melebihi tebal zona *core* dan zona *filter* atau kurang dari 3-4 m (Jitno & Davidson, 2010)[23].
12. Berdasarkan prediksi deformasi, bendungan saguling masih dapat dinilai aman terhadap gempa terbesar yang mungkin terjadi.
13. Klasifikasi kerusakan yang mungkin terjadi pada bendungan Saguling menurut Pells & Fell, 2003 merupakan kelas nomor 2, kerusakan sedang (*moderate*) dengan penurunan maksimum puncak bendungan 0,47 %.

Daftar Pustaka

- [1] Pustlitbang PUPR, Buku Peta Gempa 2017. 2017.
- [2] Pd t-14-2004-A, "Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa," Pedoman Konstruksi dan Bangunan, pp. 1–93, 2004.
- [3] K. PUPR, "Kementerian Pekerjaan Umum," Direktorat Jenderal Bina Marga, "Spesifikasi Umum, no. 11, 2010.
- [4] A. Sulaiman, "Study Dynamic Analysis of Embankment Dam Using Finite Difference Method," no. June, 2022.
- [5] M. E. Kan, H. A. Taiebat, and M. Taiebat, "Framework to assess Newmark-type simplified methods for evaluation of earthquake-induced deformation of embankments," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 54, no. 3, pp. 392–404, 2017, doi: 10.1139/cgj-2016-0069.
- [6] E. M. Rathje and J. D. Bray, "Nonlinear Coupled Seismic Sliding Analysis of Earth Structures," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, no. 11, pp. 1002–1014, 2000, doi: 10.1061/(asce)1090-0241(2000)126:11(1002).
- [7] J. D. Bray and T. Travasarou, "Simplified Procedure for Estimating Earthquake-Induced Deviatoric Slope Displacements," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 133, no. 4, pp. 381–392, 2007, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:4(381).
- [8] M. M. Khan and G. Kalyan Kumar, "Statistical Completeness Analysis of Seismic Data," *Journal of the Geological Society of India*, vol. 91, no. 6, pp. 749–753, 2018, doi: 10.1007/s12594-018-0934-6.
- [9] J. C. Stepp, "Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard.," *Proc. of the 1st Int. Conf. on Microzonation*, vol. 2, no. 1, pp. 897–910, 1972.
- [10] K. W. Campbell, "Prediction of strong ground motion using the hybrid empirical method and its use in the development of ground-motion (attenuation) relations in Eastern North America," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 93, no. 3, pp. 1012–1033, 2003, doi: 10.1785/0120020002.
- [11] D. M. Boore and G. M. Atkinson, "Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s," *Earthquake Spectra*, vol. 24, no. 1, pp. 99–138, 2008, doi: 10.1193/1.2830434.
- [12] K. W. Campbell and Y. Bozorgnia, "NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra," *Earthquake Spectra*, vol. 30, no. 3, pp. 1087–1114, Aug. 2014, doi: 10.1193/062913EQS175M.
- [13] B. S-J Chiou and R. R. Youngs, "NGA Model for Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra," 2008.
- [14] R. R. Youngs, S.-J. Chiou, W. J. Silva, and J. R. Humphrey, "Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes."
- [15] G. M. Atkinson, D. M. Boore, G. M. Atkinson, and D. M. Boore, "Empirical Ground-Motion Relations for Subduction-Zone Earthquakes and Their Application to Cascadia and Other Regions," 2003. [Online]. Available: www.seismosoc.org
- [16] J. Zhang, "Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period," 2006. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/240614152>
- [17] ICOLD, "Selecting Seismic Parameters," 2010.
- [18] ASCE 7-10, *ASCE/SEI 7-10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. 2010.
- [19] M. Riza, "Effect of selection of Ground motion Input number on Non Linear Dynamic Analysis of Rockfill Dam," no. June, 2022.
- [20] G. Gazetas, "Seismic response of earth dams: some recent developments*," 1987.
- [21] H. Bolton Seed and I. M. Idriss, "Soil Modul and Damping Factor Dynamic Response Analysis," 1970.
- [22] "Saguling Hydroelectric Power Plant, Surveillance Report".

- [23] H. Jitno and R. Davidson, “*Earthquake-induced displacements of earth dams and embankments,*” *Australian Geomechanics Journal*, vol. 45, no. 3, pp. 65–84, 2010.
- [24] S. Pells and R. Fell, “*Damage and Cracking of Embankment Dams by Earthquake and the Implications for Internal Erosion and Piping,*” *International Commission*, vol. 83, no. 17, pp. 257–274, 2003.