

Analisis Respon Statik dan Dinamik Pada Bagian Bendungan Urugan dari Bendungan Melati

Static and Dynamic Response Analysis of Embankment Dam Section of Melati Dam

Gumilar Ramadhan¹, Rendy Dwi Kartiko¹, Ahmad Taufiq², dan Dasapta Erwin Irawan¹

¹Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung (ITB), Jl. Ganesha No.10, Bandung, Jawa Barat, Indonesia.

²Balai Air Tanah, PUPR, Jl. Ir. H. Juanda No.193, Kota Bandung, Jawa Barat, Indonesia

e-mail: gumilar.ramadhan21@gmail.com

Naskah diterima 22 November 2023, selesai direvisi 26 November 2024, dan disetujui 30 Desember 2024

ABSTRAK

Dalam pembangunan dan operasionalnya, bendungan dapat mengalami kerusakan. Salah satu faktor yang dapat mengakibatkan kerusakan pada bendungan yaitu gempa bumi. Kerusakan tersebut jika tidak diantisipasi dapat mengakibatkan kegagalan dan bencana yang dapat berakibat kerugian materil dan jiwa. Untuk menghindari bencana maka diperlukan perencanaan yang baik sebelum pembangunan. Respon bendungan, baik kondisi statik dan dinamik, perlu diketahui untuk mengevaluasi keamanan dari desain bendungan. Bendungan Melati direncanakan merupakan bendungan komposit dengan jenis bendungan urugan zonasi pada sisi kiri dan bendungan *roller-compacted concrete* (RCC) pada sisi kanan. Analisis menggunakan metode finite element dilakukan terhadap bagian bendungan urugan. Analisis respon statik secara *sequential* menggunakan 23 lift didapatkan adanya *settlement* berbentuk oval pada tengah *core* dengan *settlement* terbesar 34 cm dan *displacement* horizontal sebesar 8 cm menuju sisi downstream di akhir konstruksi. Pada penelitian ini digunakan rekaman akselerasi berdasarkan deagregasi analisis *seismic hazard* untuk tiga mekanisme gempa berbeda yang kemudian dilakukan *spectral acceleration amplification* terhadap PGA. Berdasarkan parameter *controlling earthquake* digunakan gempa Tohoku dengan amplifikasi 0.8 untuk mekanisme megathrust, gempa Iwate dengan amplifikasi 2.5 untuk mekanisme patahan, dan gempa Patea dengan amplifikasi 4.3 untuk mekanisme *shallow crustal*. Deformasi permanen berdasarkan analisis *stress redistribution* pada akhir gempa didapatkan deformasi terbesar yaitu 22 cm untuk gempa Tohoku, 29 cm untuk gempa Iwate, dan 19.9 cm untuk gempa Patea. Berdasarkan analisis keamanan lereng bendungan memiliki keamanan yang sangat baik pada kondisi statik dan cukup pada kondisi dinamik. Walau demikian, faktor keamanan di sisi *upstream* mendekati 1 pada akhir gempa Tohoku dan Iwate dan diasumsikan tidak aman.

Kata kunci: analisis numerik, analisis respon statik, analisis respon dinamik, analisis stabilitas, Bendungan

ABSTRACT

During construction and operation, dams can experience damage. One factor that can cause damage to a dam is an earthquake. If this damage is not anticipated, it can result in failure and disaster which can result in material and life losses. To avoid such disasters, good planning is needed before construction. The response of the dam, both static and dynamic conditions, needs to be known to evaluate the safety of the dam design. The Melati dam is planned to be a composite dam with a zoned fill dam on the left side and a roller-compacted concrete (RCC) dam on the right side. Analysis using the finite element method was carried out on the embankment dam section. Sequential static response analysis using 23 lifts showed that there was an oval-shaped settlement in the middle of the core with the largest settlement of 34 cm and a horizontal displacement of 8 cm towards the downstream side at the end of construction. In this study, acceleration recordings were used based on deaggregation of seismic hazard analysis for three different earthquake mechanisms and then spectral acceleration amplification was carried out based on the obtained PGA. Based on the controlling earthquake parameters, the Tohoku earthquake was used with an amplification of 0.8 for the megathrust mechanism, the Iwate earthquake with an amplification of 2.5 for the fault mechanism, and the Patea earthquake with an amplification of 4.3 for the shallow crustal mechanism. Permanent deformation based on stress redistribution analysis showed that the largest deformation was 22 cm for the Tohoku earthquake, 29 cm for the Iwate

earthquake, and 19.9 cm for the Patea earthquake. Based on the safety analysis, the dam slopes have very good safety factors in static condition and sufficient in dynamic conditions. However, factor of safety on the upstream side are close to 1 at the end of Tohoku and Iwate earthquakes which was assumed to be not safe.

Keywords: numerical analysis, static response analysis, dynamic response analysis, stability analysis, Dam

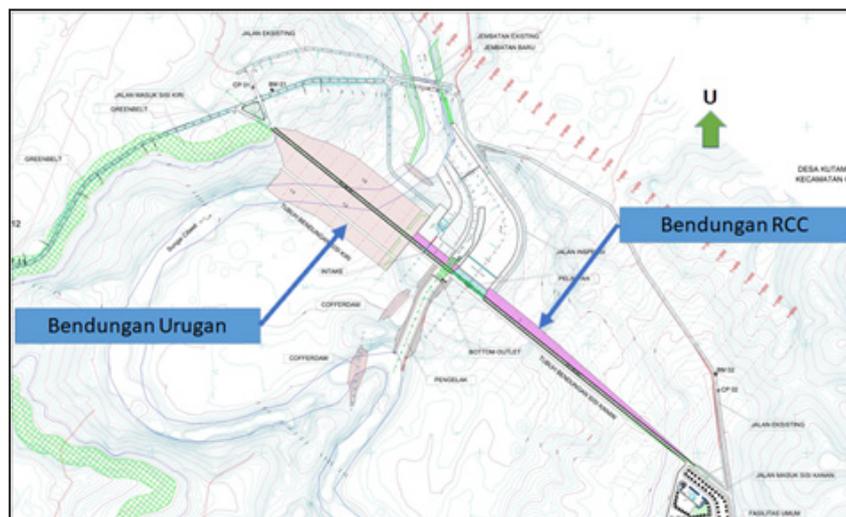
PENDAHULUAN

Air merupakan sebuah sumber kehidupan terbesar. Di negara berkembang, alokasi air untuk keperluan masyarakat, lingkungan atau industri merupakan sebuah persoalan penting. Sumber daya air yang terbatas dan permintaan terhadap air yang besar membutuhkan perencanaan dan pengelolaan sumber daya air yang baik (Marselina *et al.*, 2017). Bendungan, beserta waduk, menjadi infrastruktur penting dalam pengelolaan air. Selain untuk menampung air dalam jumlah yang besar, bendungan juga dapat berguna dalam mengalirkan air ke dalam sistem irigasi, pembangkit listrik, pengontrol banjir dan lainnya (Wahlstrom, 1974).

Dalam pembangunan dan operasionalnya, bendungan dapat mengalami kerusakan. Salah satu faktor yang dapat mengakibatkan kerusakan pada bendungan yaitu gempa bumi (Kramer, 1996). Guncangan gempa dapat mengakibatkan penurunan secara tidak merata, kebocoran “*pip-ing*”, longsoran pada sisi bendungan, likuifaksi, dan lain-lain dapat terjadi pada bendungan (Seed *et al.*, 1978; USSD Committee on Earthquakes, 2014a). Kerusakan tersebut jika tidak dian-

tisipasi dapat mengakibatkan kegagalan dan bencana yang dapat berakibat kerugian materil dan jiwa. Untuk menghindari hal tersebut maka diperlukan perencanaan yang baik sebelum pembangunan. Respon bendungan, baik secara statik dan dinamik, perlu diketahui untuk mengevaluasi keamanan dari desain bendungan. Salah satu metode yang umum digunakan yaitu menggunakan pemodelan numerik (Chugh, 2021; Enzell *et al.*, 2021; Kramer, 1996; Kuhlaway *et al.*, 1969).

Bendungan Melati direncanakan merupakan bendungan komposit dengan jenis bendungan urugan zonasi pada sisi kiri dan bendungan *roller-compacted concrete* (RCC) pada sisi kanan seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1. Tinggi dari bendungan urugan direncanakan setinggi 42 meter, lebar 253 meter, dan memiliki *berm* dengan lebar 8 meter pada ketinggian tengah bendungan. Untuk mengevaluasi keamanan dari desain bendungan, pada penelitian ini dilakukan analisis respon statik dan dinamik pada sisi kiri bendungan atau pada bagian bendungan urugan. Secara global pengaruh gempabumi terhadap bendungan sudah banyak terdokumentasi. Se-



Gambar 1. Denah rencana bendungan.

jarahnya, hanya sedikit bendungan mengalami kerusakan signifikan ketika terkena gempa bumi dan dari sejumlah bendungan tersebut hanya beberapa bendungan yang mengalami kegagalan total (USSD Committee on Earthquakes, 1992, 2000, 2014b). Pada kasus-kasus bendungan yang mengalami guncangan yang cukup berat, gempa bumi menghasilkan kerusakan yang bervariasi, dari besar kerusakan permanen, lokasi kerusakan, hingga potensi pergerakan tanah. Bendungan dengan jenis urugan cenderung mengalami kerusakan lebih tinggi dibandingkan jenis bendungan lainnya. Kerusakan umumnya diakibatkan oleh gempa bumi dengan intensitas lebih tinggi dari derajat VII pada skala *Modified Mercalli Intensity* (MMI) (Prisco *et al.*, 1985; USSD Committee on Earthquakes, 1992).

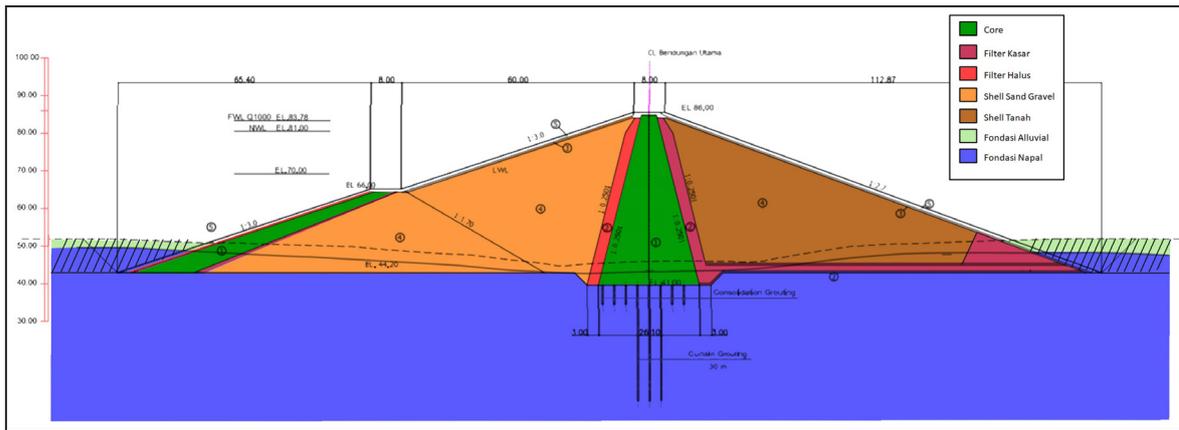
Salah satu kasus kerusakan bendungan akibat gempa paling terkenal yaitu pada Bendungan Lower Van Norman atau biasa disebut Lower San Fernando, California, Amerika Serikat yang diakibatkan oleh gempa San Fernando. Bendungan ini merupakan bendungan urugan dengan jenis material *hydraulic fill*. Pada 9 Februari 1971 bendungan Lower San Fernando diguncang oleh gempa dengan *moment magnitude* 6.6 Mw yang mengakibatkan kerusakan signifikan pada tubuh bendungan. Investigasi lapangan pada lokasi menunjukkan terjadinya longsoran likuifaksi pada bagian bawah sisi *upstream* dari bendungan. Kasus lainnya, Bendungan Matahina merupakan urugan tanah dan batuan dengan tinggi 86 meter pada Sungai Rangataika, Selandia Baru. Pada 2 Mei 1987 bendungan ini diguncang gempa Edgecumbe dengan *moment magnitude* 6.5 Mw. Survei terhadap lokasi bendungan setelah gempa menunjukkan bendungan mengalami penurunan signifikan. Sebagian besar dari penurunan terjadi secara seketika, dan penurunan berlanjut hingga beberapa minggu setelahnya. *Crest* mengalami penurunan maksimum sebesar 10.2 cm dan bergerak ke arah *downstream* sebesar 25.4 cm akibat gempa. Penurunan lokal pada *shell* bagian *upstream* terjadi hingga 8 meter (USSD Committee on Earthquakes, 1992, 2000).

METODOLOGI PENELITIAN

Untuk menganalisis respon bendungan pada kondisi statik dan dinamik dilakukan pemodelan numerik. Pada penelitian ini digunakan bantuan perangkat lunak GeoStudio 2022 untuk melakukan pemodelan dan Seismosoft SeismoMatch dan Seismosoft SeismoSignal untuk pengolahan dan modifikasi data *ground motions*. Parameter yang digunakan didapatkan berdasarkan hasil investigasi lapangan, pengujian lapangan secara *in-situ*, pengujian laboratorium, dan parameter desain. Selain data parameter geoteknik, digunakan juga data hasil analisis *seismic hazard*. Hasil analisis tersebut digunakan dalam penentuan dan modifikasi terhadap data *ground motions* yang dikumpulkan dari *database* Strong Motion Virtual Center (VDC) dan NGAWest2. Dikarenakan kerahasiaan dari perencanaan desain dan data, bendungan akan disebut sebagai Bendungan Melati.

Bagian bendungan urugan yang direncanakan bertipe zonasi dengan jenis *fill* tanah. Zonasi dari bendungan terdiri dari *core*, zona transisi (*filter*) kasar dan halus, *fill shell* tanah, dan *fill shell sand* dan *gravel*. Tinggi dari bendungan urugan direncanakan setinggi 42 meter, lebar 253 meter, dan memiliki *berm* dengan lebar 8 meter pada ketinggian 22 meter. *Slope* pada bagian *upstream* memiliki rasio 1:3 atau kemiringan 18.4° derajat. Pada bagian *downstream slope* memiliki rasio 1:2.7 atau 20.3°. Ketinggian *water level normal* dari bendungan direncanakan setinggi 37 meter dengan ketinggian *water level* penuh setinggi 39 meter. Desain dari bendungan digambarkan pada Gambar 2.

Pada penelitian ini analisis dibagi menjadi analisis statik dan dinamik. Analisis numerik dalam perangkat lunak GeoStudio 22 digunakan metode *finite element*. Metode ini digunakan rangkaian *node* untuk diskritisasi model. Pada rangkaian *node* tersebut dilakukan perhitungan untuk mendapatkan kesetimbangan. Dalam perangkat lunak GeoStudio, setiap analisis membutuhkan nilai *stress* dan *displacement* sebagai *initial condition* dari fungsi *matrix* di setiap *node*. Nilai *stress* dan *displacement* umum-



Gambar 2. Penampang melintang desain bendungan urugan.

nya didapatkan dengan memasukan *boundary condition* atau melakukan analisis *initial static* terlebih dahulu. *Initial condition* tersebut namun dapat juga didapatkan dari analisis lain yang menghasilkan nilai *stress* dan *displacement*. Dengan menghubungkan beberapa analisis, pemodelan dapat dilakukan untuk menggambarkan suatu proses atau kejadian, dalam hal ini yaitu pembangunan, operasi, dan kejadian gempa dari bendungan.

Alur tahapan analisis dari pemodelan yaitu; Analisis *initial stress* pada kondisi *in-situ*, analisis konsolidasi konstruksi bendungan, analisis konsolidasi pengisian dan operasional bendungan, analisis keamanan statik, analisis respon dinamik, analisis keamanan dan deformasi setelah gempa.

Untuk memodelkan respon statik, pada penelitian ini digunakan model material Mohr-Coulomb. Untuk memodelkan respon dinamik digunakan model material *nonlinear*. Sebagai pemodelan awal, model material Mohr-Cou-

lomb dapat dianggap cukup untuk menggambarkan respon statik pada saat pembangunan bendungan (Duncan *et al.*, 1980). Sebelum parameter hasil pengujian digunakan dalam pemodelan, dilakukan analisis *uncertainty* terhadap parameter tersebut. Nilai yang digunakan dalam pemodelan yaitu pada distribusi kumulatif 50% atau rata-rata dari populasi (Phoon *et al.*, 2022). Parameter yang digunakan dijabarkan pada Tabel 1.

Dikarenakan ketidakterediaan data maka beberapa parameter ditentukan berdasarkan perhitungan estimasi. Parameter modulus elastik efektif diestimasi menggunakan persamaan *relationship* (Kulhaway *et al.*, 1969):

$$E = K\sigma^n \dots\dots\dots (1)$$

- E = *effective elastic modulus*
- σ = *confining pressure*
- K = *modulus number*
- n = *exponent number*

Tabel 1. Parameter geoteknik pondasi dan material urugan

No	Data	Jenis	Permeabilitas (m/sec)	Unit Weight (KN/m ³)	Dry Unit Weight (KN/m ³)	C' (kPa)	Phi'	Poisson Ratio	Void Ratio		
1	Core	Clay	2,97E-09	17,14	12,5	*1	23,6	*1	23,1	0,45	1,16
2	Filter Halus	Silt sand	2,93E-06	20,39	17,48	*1	35	*1	22,5	0,3	1,13
3	Filter Kasar	Sand	5,00E-04	21,56	19,49	*1	0	*2	30	0,3	0,60
4	Fill <i>Upstream</i>	Sand Gravel	1,01E-04	22,06	19,86	*1	0	*2	40	0,3	0,30
5	Fill <i>Downstream</i>	Silt	2,94E-08	18,18	16,18	*1	29,84	*1	22,7	0,2	1,14
8	Fondasi Napal	Napal	6,66E-07	15,20	14,41	*1	301,8	*1	30,3	0,3	0,76

*1 Hasil pengujian lab *2 Parameter Desain

Tabel 2. Estimasi parameter *effective elastic modulus*

No	Data	Estimasi <i>K</i>	<i>n Exponent</i>	Estimasi Jenis Tanah/Batuan	Keterangan Korelasi
1	Core	205	0,42	Clay	Casagrande <i>et al</i> (1963) CL-Ab Silty Clay (Canyon Dam)
2	Filter Halus	175	0,41	Silty sand	Casagrande <i>et al</i> (1963) CL-Aa Silty Clay (Canyon Dam)
3	Filter Kasar	345	0,54	Sand	Lee (1965) SP-4A Sacramento River Sand
4	Fill <i>Upstream</i>	665	0,28	Sand Gravel	Bechtel (1969) Gravel (Mew Don Pedro Dam Shell)
5	Fill <i>Downstream</i>	270	0,59	Silt	Linell and Shea (1960) SM-SC-2 Silty Clayey Sand (Hopkinton Dam)
6	Fondasi Napal	-	-	Napal	Constant = 781525 Kpa

Tabel 3. Hasil estimasi parameter G_{max}

No	Data			Fungsi G_{max}					
	Data	Jenis	Plasticity Index	Void Ratio	Overconsolidation Ratio		K		
1	Core	Clay	34,94	*1	1,16	*1	1	*2	-
2	Filter Halus	Silt sand	23,8	*1	1,13	*1	1	*2	-
3	Filter Kasar	Sand	Medium Dense Sand						50
4	Fill <i>Upstream</i>	Sand Gravel	Medium Dense Gravel						80
5	Fill <i>Downstream</i>	Silt	28,73	*1	1,13	*1	1	*2	-
8	Fondasi Napal	Napal	Hasil MASW						180

*1 Hasil pengujian lab *2 Parameter Desain

Nilai *K* dan *n* pada penelitian ini didapatkan berdasarkan kompilasi pengujian *stress-strain* dan karakteristik tanah oleh Duncan *et al.*, (1980). Untuk mendapatkan nilai *K* dan *n*, pada penelitian ini data parameter geoteknik material yang tersedia dibandingkan dengan karakteristik data pengujian dalam Duncan *et al.* (1980) dan Kulhaway *et al.* (1969). Nilai *K* dan *n* yang digunakan untuk setiap parameter ditunjukkan pada Tabel 3.

Untuk mendapatkan parameter *maximum shear modulus* (G_{max}) dari material urugan, digunakan persamaan relationship untuk material jenis tanah kohesi (GEO-SLOPE International Ltd., 2014; Kramer, 1996; Seed and Idriss, 1970):

$$G_{max} = 625 \left(\frac{1}{(0.3 + 0.7e^2)} \right) (OCR)^k \sqrt{Pa\sigma' m} \dots\dots\dots (2)$$

$$k = \frac{PI^{0.72}}{50} \dots\dots\dots (3)$$

- G_{max} = maximum shear modulus
- e = void ratio
- OCR = over-consolidation ratio
- Pa = tekanan atmosfer
- PI = plastic index

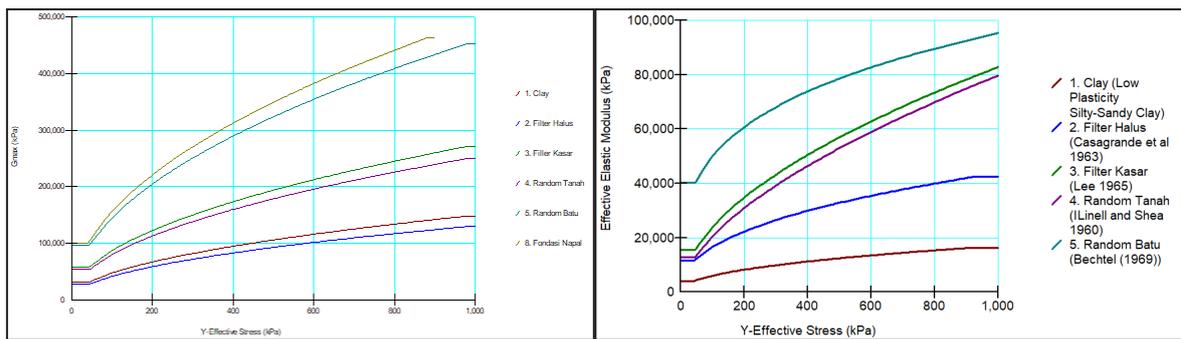
Untuk mendapatkan parameter G_{max} untuk material dengan jenis *granular* digunakan persamaan relationship (GEO-SLOPE International Ltd., 2014; Kramer, 1996; Seed and Idriss, 1970):

$$G_{max} = 22K \sqrt{Pa\sigma' m} \dots\dots\dots (4)$$

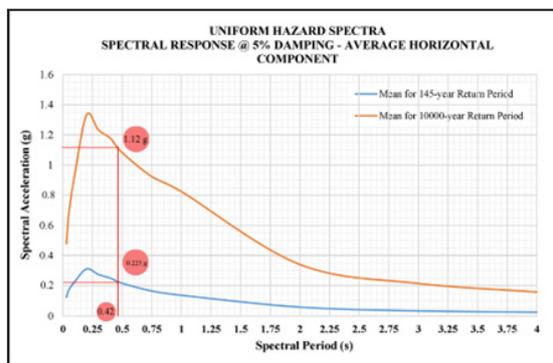
$$\sigma_m = \frac{\sigma_v + K_0\sigma_v}{3} \dots\dots\dots (5)$$

Pada penelitian ini analisis terhadap bahaya seismik pada lokasi bendungan didasarkan oleh penelitian seismic hazard oleh PT. Sarana Bhuana Jaya (2021). Berdasarkan hasil analisis didapatkan *uniform hazard spectra* (UHS) untuk periode ulang 145 tahun dan 10000 tahun seperti pada Gambar 4. Perhitungan periode alami menggunakan persamaan empiris oleh Matsumoto (2010) didapatkan periode alami dari bendungan urugan yaitu 0.42. Berdasarkan analisis deagregasi terhadap analisis *seismic hazard* didapatkan parameter magnitudo dan jarak paling berpengaruh untuk sumber gempa *shallow crustal*, patahan, dan *megathrust*. Nilai magnitudo dan jarak dijabarkan pada Tabel 4.

Analisis Respon Statik dan Dinamik Pada Bagian Bendungan Urugan dari Bendungan Melati



Gambar 3. a). Kurva *effective elastic modulus* (kPa) vs *effective stress* (kPa). b). Kurva *Gmax* (kPa) vs *effective stress* (kPa).



Gambar 4. *Uniform hazard spectra* hasil analisis *seismic hazard* (PT. Sarana Bhuana Jaya, 2021).

$$T = \frac{0.29}{100H} + 0.30 \dots\dots\dots (6)$$

H = tinggi bendungan (m)
T = periode natural

Untuk mensimulasikan bahaya gempa yang paling berpengaruh maka diperlukan rekaman percepatan (*acceleration time history*) dari gempa yang sesuai. Umumnya, pada lokasi yang tidak tersedia rekaman percepatan maka dapat digunakan metode-metode modifikasi

terhadap rekaman percepatan yang tersedia di area lain. Data rekaman percepatan yang digunakan harus sesuai atau mendekati dengan gempa paling berpengaruh (*controlling earthquake*) untuk mekanisme gempa tertentu (Kramer, 1996; PT. Sarana Bhuana Jaya, 2021; Sianko et al., 2020). Pada penelitian ini digunakan data rekaman percepatan yang didapatkan dari *database* Strong Motion Virtual Center (VDC) dan PEER Ground Motion Database NGA-WEST 2. Data percepatan yang didapatkan kemudian dilakukan *amplitude scaling* terhadap *peak ground acceleration* (PGA).

Pada penelitian ini digunakan tiga *ground motions* berdasarkan sumber gempa yang berbeda yang dilakukan *amplitude scaling* berdasarkan PGA dari UHS. Data rekaman untuk yang digunakan yaitu rekaman gempa Darfield 2010 stasiun Atene A, Iwate 2008 stasiun Yokote O Morimachi, dan Tohoku 2011 stasiun IWT007. Didapatkan akselerasi maksimum setelah modifikasi yaitu 0.53 g, 0.55 g, dan 0.57 g. Karakteristik dari gempa dijabarkan pada Tabel 5.

Tabel 4. Rangkuman Hasil Deagregasi (PT. Sarana Bhuana Jaya, 2021)

Sumber Gempa	Periode Ulang 145 Tahun		Periode Ulang 10000 Tahun	
	<i>Mcontrolling</i> (Mw)	<i>Rcontrolling</i> (Km)	<i>Mcontrolling</i> (Mw)	<i>Rcontrolling</i> (Km)
<i>Shallow Crustal</i>	4,97	102,41	5,07	91,89
Patahan	6,55	43,43	6,48	37,66
<i>Megathrust</i>	7,92	140,8	8,34	140,32

Tabel 4. Hasil estimasi *carbon flux* Daerah Utara

UTARA					
Sample	Kadar Bikarbonat (mg/L)	Debit Min (L/day)	Carbon Flux Min (mg/day)	Debit Max (m3/day)	Carbon Flux Max (mg/day)
TA01	346,1	1,50,E+09	5,18,E+11	8,08,E+10	2,80,E+13
TA 03	346,1	1,83,E+08	6,34,E+10	8,24,E+10	2,85,E+13
TA 04	271,9	1,83,E+08	4,98,E+10	7,67,E+10	2,08,E+13
Total			6,31,E+11		7,73,E+13
Rata – rata			3,16,E+11		2,58,E+13

Tabel 5. Hasil estimasi *carbon flux* Daerah Selatan

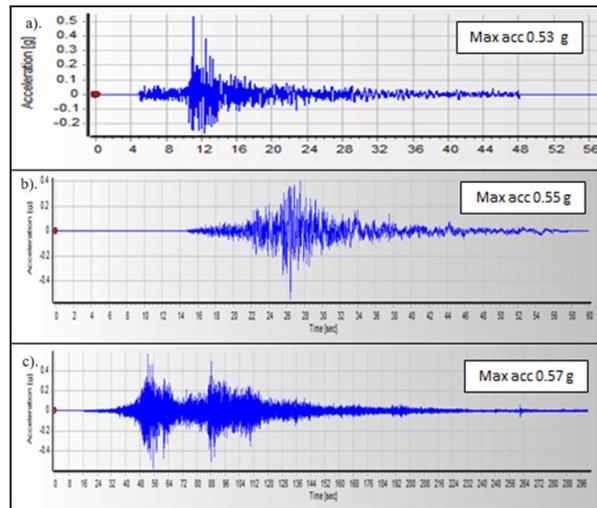
SELATAN					
Sample	Kadar Bikarbonat (mg/L)	Debit Min (L/hari)	Carbon Flux Min (mg/hari)	Debit Max (m3/hari)	Carbon Flux Max (mg/hari)
TA 05	1878,7	9,74,E+09	1,83,E+13	5,21,E+10	9,78,E+13
TA 06	321,4	2,05,E+08	6,58,E+10	2,28,E+09	7,33,E+11
TA 07	327,5	9,74,E+09	3,19,E+12	6,26,E+10	2,05,E+13
TA 09	290,5	9,61,E+09	2,79,E+12	6,39,E+10	1,86,E+13
TA-10	358,4	9,61,E+09	3,44,E+12	6,39,E+10	2,29,E+13
TA-11A	321,4	1,00,E+10	3,22,E+12	7,15,E+10	2,30,E+13
TA-12A	210,1	1,21,E+10	2,53,E+12	7,78,E+10	1,63,E+13
TA-13B	333,7	1,21,E+10	4,02,E+12	7,78,E+10	2,59,E+13
TA-14	377	1,05,E+10	3,95,E+12	6,50,E+10	2,45,E+13
TA 15	370,8	1,05,E+10	3,89,E+12	6,50,E+10	2,41,E+13
TA-16	352,3	1,05,E+10	3,69,E+12	6,50,E+10	2,29,E+13
Total			4,91,E+13		2,97,E+14
Rata - rata			4,46,E+12		2,70,E+13

HASIL DAN PEMBAHASAN

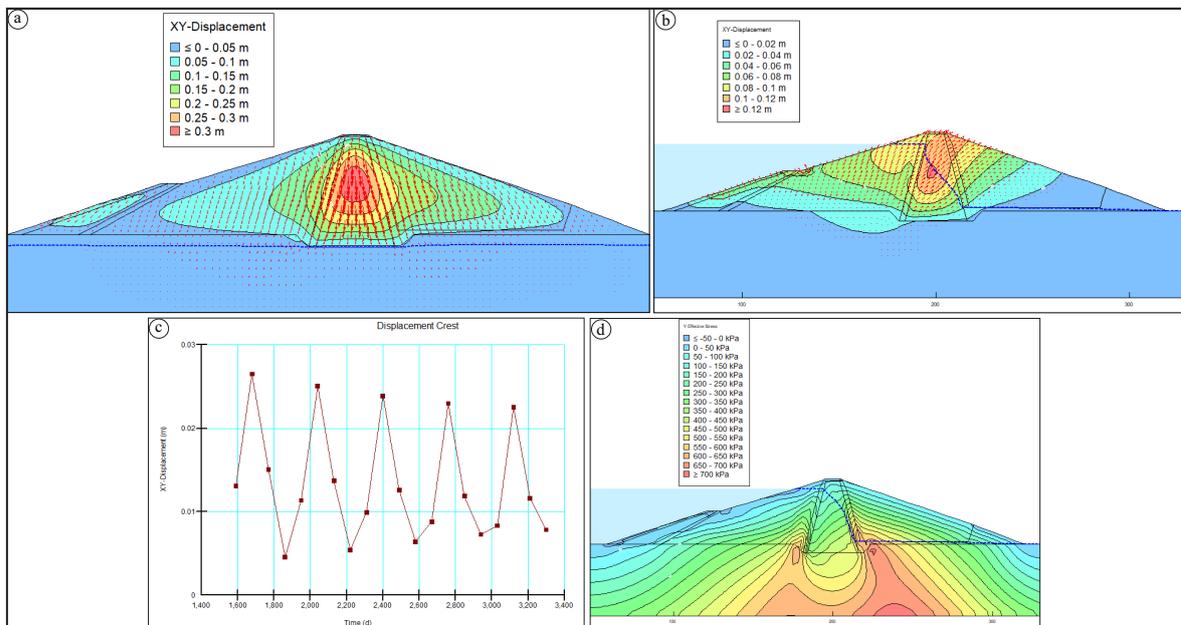
Pada analisis ini penentuan *stress* dimulai dari kondisi in-situ pondasi setelah dilakukan penggalian. Kemudian analisis SEEP/W digunakan untuk mendapatkan kondisi *pore water pressure* pada kondisi *steady state*. Setelah didapatkan *initial stress*, analisis dilanjutkan dengan mensimulasi pembangunan bendungan. Analisis konsolidasi dilakukan dengan menambahkan lapisan *lift* material urugan secara perlahan menggunakan analisis SIGMA/W. Penambahan *lift* dengan tinggi dua meter dilakukan dengan rentang waktu 16 hari agar *pore water pressure* dapat mengalami dissipasi. Total lapisan *lift* yang digunakan yaitu 23 *lift* dengan total waktu konstruksi 480 hari. Pada akhir dari konstruksi kemudian dilakukan analisis konsolidasi selama 360 hari untuk mengetahui penurunan akibat dari disipasi *pore water pressure*.

Pada akhir konstruksi didapatkan adanya *settlement* dengan bentuk oval pada bagian tengah bendungan dengan besar tertinggi yaitu 34 cm. Keseleruhan bendungan mengalami pergeseran horizontal ke arah

downstream dengan nilai terbesar yaitu 8 cm. Analisis konsolidasi setelah konstruksi tidak menunjukkan adanya *settlement* yang signifikan. Pengisian reservoir dilakukan dengan menaikkan ketinggian air secara perlahan selama 660 hari menggunakan analisis SIGMA/W. Kenaikan air dilakukan setinggi 5 meter setiap 60 hari. Pada setiap kenaikan, diberikan waktu 40 hari tanpa kenaikan untuk mengakomodasi disipasi *pore water pressure*. Pada akhir pengisian terdapat *displacement* berupa *uplift* dengan besar terbesar yaitu 13.6 cm. Selain itu, pengisian menyebabkan penurunan *effective stress* pada sisi *upstream*. Pada akhir analisis pengisian dilanjutkan dengan simulasi operasional bendungan. Selama operasional diasumsikan adanya penurunan sebesar lima meter yang pulih kembali selama 360 hari dan membentuk fungsi sinusoidal. Hal ini bertujuan untuk mensimulasikan perubahan musim. Simulasi dilakukan selama lima revolusi atau lima tahun. Didapatkan adanya *displacement* naik dan turun yang berulang selama lima tahun. *Displacement* dan kondisi *stress* ditunjukkan pada Gambar 6.



Tabel 4. Hasil estimasi *carbon flux* Daerah Utara



Gambar 6. a). Displacement settlement pada akhir konstruksi. b). Displacement uplift pada akhir pengisian. Panah merah menunjukkan vektor arah dari displacement. c). Besar displacement pada crest selama operasional bendungan. d). Effective stress vertikal pada akhir operasi.

Pemodelan respon dinamik bendungan dilakukan menggunakan kondisi *stress* dan *pore water pressure* pada akhir dari simulasi operasional. Pada penelitian ini dilakukan tiga simulasi terpisah untuk ketiga rekaman akselerasi yang telah dibuat menggunakan analisis *QUAKE/W nonlinear*. Analisis deformasi permanen dilakukan menggunakan analisis *SIGMA/W stress redistribution*. Untuk mengurangi waktu pemrosesan, dilakukan pemotongan terhadap

rekaman akselerasi sesuai dengan *significant duration* pada *arias intensity* 5 - 95 %.

Pada analisis menggunakan rekaman gempa Tohoku didapatkan amplifikasi terhadap rekaman input pada dasar bendungan sebesar dua hingga empat kali. *Predominant period* dari simulasi ini yaitu pada 0.17. Analisis *post-seismic deformation* didapatkan adanya deformasi permanen pada *crest*, sisi *downstream* yang memotong *core* dan pada sisi *upstream berm*. Pada *crest*

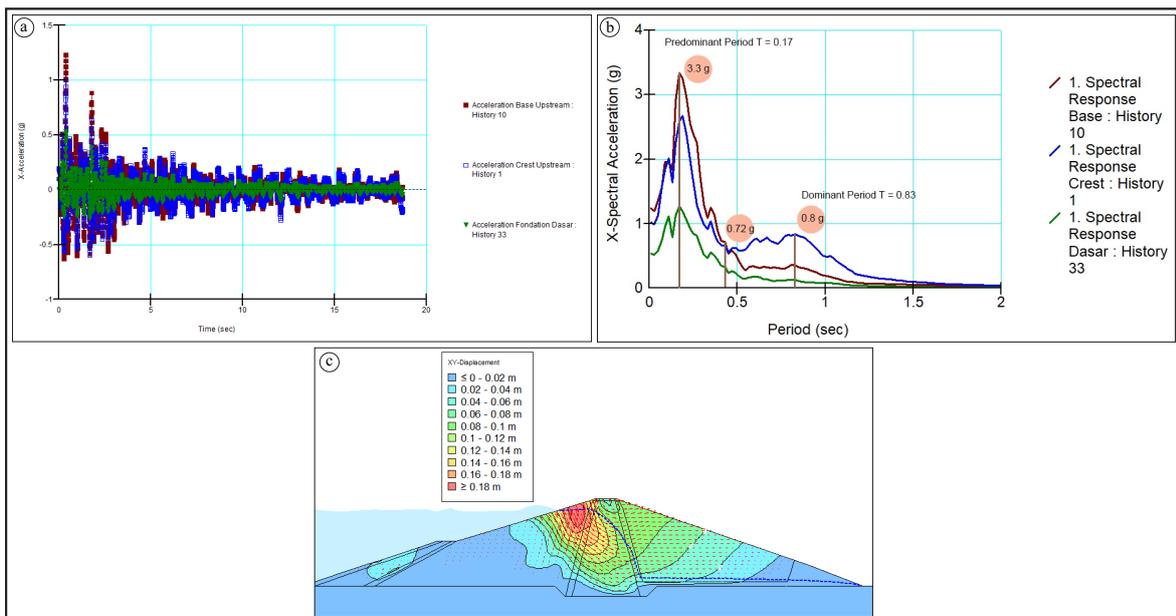
besar *displacement* yaitu sebesar 9 cm dengan *displacement* terbesar yaitu 19.9 cm. Vektor arah pergerakan menunjukkan bahwa deformasi pada *crest* bergerak menuju arah *downstream* dan deformasi pada *berm* bergerak menuju arah *upstream*. Arah dan persebaran dari deformasi menunjukkan adanya kemungkinan *slip surface* pada lokasi *displacement*. Rekaman gempa setelah simulasi dan deformasi ditunjukkan pada Gambar 7.

Pada analisis menggunakan rekaman gempa Tohoku didapatkan amplifikasi terhadap rekaman input pada dasar bendungan sebesar dua hingga empat kali, sedangkan pada *crest* terdapat satu hingga dua kali terhadap akselerasi pada dasar bendungan. *Predominant period* dari simulasi ini yaitu pada 0.17. Analisis post-seismic deformation didapatkan adanya deformasi permanen pada *crest*, sisi *downstream* yang memotong *core* dan pada sisi *upstream berm*. Pada *crest* besar *displacement* yaitu sebesar 23 cm dengan *displacement* terbesar yaitu 29 cm. Vektor arah pergerakan menunjukkan bahwa deformasi pada *crest* bergerak menuju arah *downstream* dan deformasi pada *berm* bergerak menuju arah *upstream*. Arah dan persebaran dari deformasi

menunjukkan adanya kemungkinan *slip surface* pada lokasi *displacement*. Rekaman gempa setelah simulasi dan deformasi ditunjukkan pada Gambar 8.

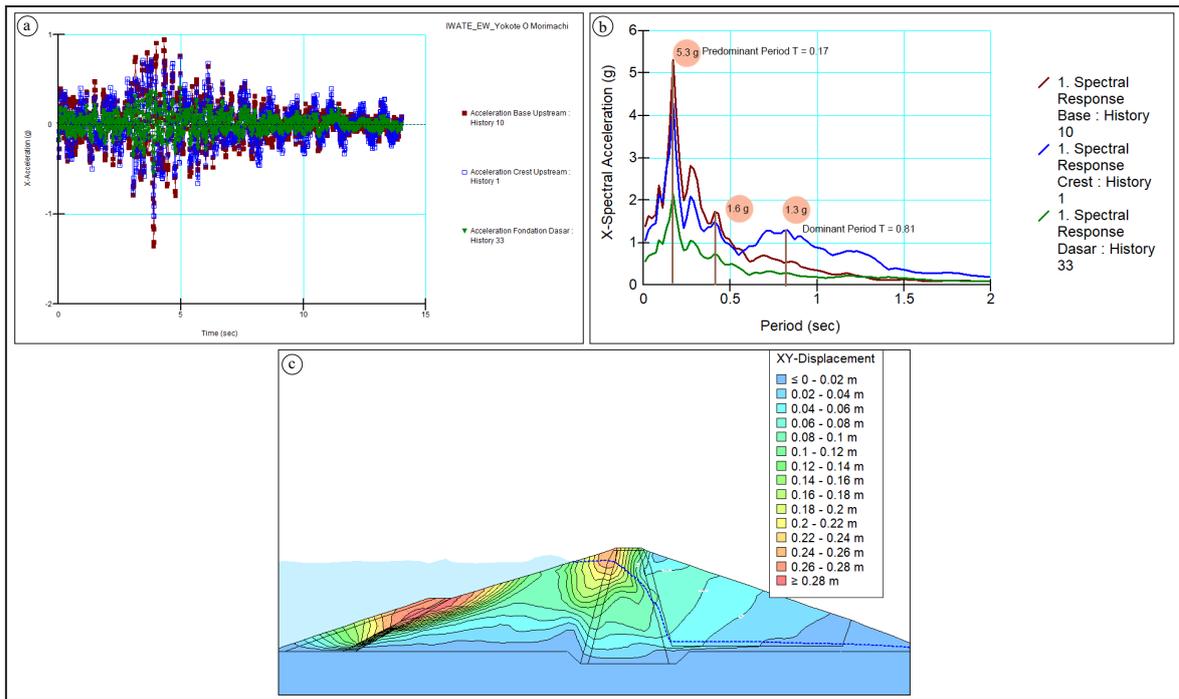
Pada analisis menggunakan rekaman gempa Tohoku didapatkan amplifikasi terhadap rekaman input pada dasar bendungan sebesar dua hingga empat kali. *Predominant period* dari simulasi ini yaitu pada 0.15. Analisis *post-seismic deformation* didapatkan adanya deformasi permanen pada *crest*, sisi *upstream*, dan deformasi ringan pada sisi *downstream*. Pada *crest* besar *displacement* yaitu 21 cm dan *displacement* terbesar yaitu 22 cm. Vektor arah pergerakan menunjukkan bahwa deformasi pada *crest* bergerak menuju arah *upstream* dan deformasi ringan menuju arah *downstream*. Arah pergerakan menunjukkan adanya kemungkinan *slip surface* pada lokasi *displacement*. Rekaman gempa setelah simulasi dan deformasi ditunjukkan pada Gambar 9.

Analisis kestabilan pada kondisi statik didapatkan nilai keamanan yang sangat baik. Pada sisi *upstream*, *slip surface* dengan kondisi *critical* memiliki nilai keamanan 2.573, sedangkan pada sisi *downstream*, *slip surface* dengan kondisi *critical* memiliki nilai keamanan 1.931. Pada saat

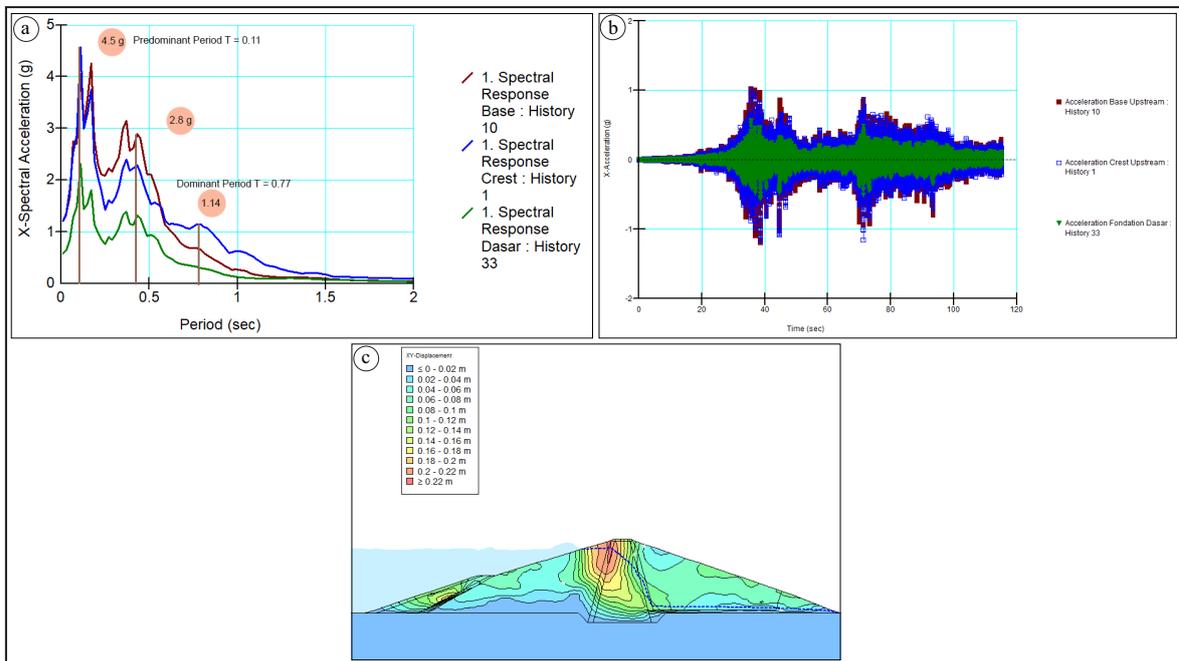


Gambar 7. a). Akselerasi gempa Patea pada *crest* bendungan (biru), *base* bendungan (merah), dan *boundary model* (hijau). b). *Spectral response* gempa Patea. c). Deformasi permanen gempa Patea. Panah merah menunjukkan vektor arah dari deformasi.

Analisis Respon Statik dan Dinamik Pada Bagian Bendungan Urugan dari Bendungan Melati



Gambar 8. a). Akselerasi gempa Iwate pada *crest* bendungan (biru), *base* bendungan (merah), dan *boundary model* (hijau). b). *Spectral response* gempa Patea. c). Deformasi permanen gempa Iwate. Panah merah menunjukkan vektor arah dari deformasi.



Gambar 9. (a) Akselerasi gempa Tohoku pada *crest* bendungan (biru), *base* bendungan (merah), dan *boundary model* (hijau). (b) *Spectral response* gempa Patea. (c) Deformasi permanen gempa Tohoku. Panah merah menunjukkan vektor arah dari deformasi.

kondisi setelah gempa secara umum terdapat adanya penurunan tingkat keamanan pada sisi *upstream* dan *downstream*. Pada model dengan gempa Patea terdapat peningkatan tingkat kea-

manan pada sisi *upstream*, hal ini diperkirakan akibat amplifikasi terhadap rekaman gempa yang terlalu tinggi. Rangkuman tingkat keamanan ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Rangkuman respon dinamik bendungan

Nama Gempa	Nama Stasiun	Vs30 (m/s)	Spectral Acceleration Natural Period (g)	Displacement Terbesar (m)	FOS Downstream	FOS Upstream
"Patea"	"Atene A"	370	0,35	0,199	1,428	3,179
"Iwate_ Japan"	"Yokote O Morimachi"	346,81	0,74	0,29	1,863	1,088
"Tohoku"	"IWT007"	500	1,17	0,22	1,311	1,112

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis deformasi statik didapatkan bendungan mengalami *settlement* berbentuk oval dengan *settlement* terbesar 32 cm dengan *displacement horizontal* 8 cm menuju sisi *downstream*. Setelah pengisian dan operasi, bendungan mengalami *displacement* berupa *uplift* dengan *displacement* terbesar 13.6 cm. Berdasarkan analisis keamanan lereng bendungan memiliki keamanan yang sangat baik pada kondisi statik. Pada kondisi dinamik terdapat adanya *displacement* dan pengurangan tingkat keamanan bendungan yang signifikan pada sisi *upstream*. Nilai tingkat keamanan model gempa Iwate dan Tohoku berada diatas nilai ambang 1 namun tetap berada pada rentang tidak aman.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Balai Besar Wilayah Sungai Citarum yang telah menyediakan data untuk keperluan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Chugh, A. K. (2021): Numerical Simulation of Seismic Behavior of Menta Dam, Italy BT - Numerical Analysis of DamsG. Bolzon, D. Sterpi, G. Mazzà, and A. Frigerio, eds., Springer International Publishing, Cham, 453–470.

Duncan, J. M., Bryne, P., Wong, K. S., and Mabry, P. (1980): *Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses*, TA - TT -, College of Engineering,

Office of Research Services, University of California Berkeley, Calif., Berkeley, Calif. SE - iii, 70, <https://doi.org/LK> - <https://worldcat.org/title/26728425>

Enzell, J., Malm, R., Abbasiverki, R., and Ahmed, L. (2021): Non-linear Behavior of a Concrete Gravity Dam During Seismic Excitation: A Case Study of the Pine Flat Dam BT - Numerical Analysis of DamsG. Bolzon, D. Sterpi, G. Mazzà, and A. Frigerio, eds., Springer International Publishing, Cham, 99–112.

GEO-SLOPE International Ltd., - (2014): *Dynamic Modeling With QUAKE/W*, GEO-SLOPE International, Ltd., Calgary, Alberta, Canada.

Kramer, S. L. (1996): *Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall international series in civil engineering and engineering mechanics TA - TT -*, Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey, Upper Saddle River, New Jersey SE - xviii, 653 pages : illustrations, maps ; 24 cm. <https://doi.org/LK> - <https://worldcat.org/title/32821264>

Kulhaway, F. H., Duncan, J. M., and Seed, H. B. (1969): Finite Element Analyses of Stresses and Movements in Embankments During Construction, *Soils and Pavement Laboratory (U.S.)*, retrieved from internet: <https://erdc-library.erdcdren.mil/jspui/handle/11681/20520>.

Marselina, M., Sabar, A., Salami, I. R., and Marganingrum, D. (2017): Model prakiraan debit air dalam rangka optimalisasi pengelolaan Waduk Saguling – Kaskade Citarum, *Jurnal Teknik Sipil ITB*, 24(1), 99–108. <https://doi.org/10.5614/JTS.2017.24.1.12>

- Matsumoto, N. (2010): *The Recent Earthquakes and Dam Safety in Japan*, Tokyo, Japan.
- Phoon, K.-K., Cao, Z.-J., Ji, J., Leung, Y. F., Najjar, S., Shuku, T., Tang, C., Yin, Z.-Y., Ikumasa, Y., and Ching, J. (2022): Geotechnical uncertainty, modeling, and decision making, *Soils and Foundations*, **62**(5), 101189. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101189>
- Priscu, R., Popovici, A., Stematiu, D., and Stere, C. (1985): *Earthquake Engineering for Large Dams*, Wiley, Hoboken, NJ, USA.
- PT. Sarana Bhuana Jaya (2021): *Laporan Pendukung: LAPORAN NEOTEKTONIK & SEISMIC HAZARD*.
- Seed, H. B., and Idriss, I. M. (1970): Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses, retrieved from internet: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB197869.xhtml>.
- Seed, H. B., Makdisi, F. I., and de Alba, P. (1978): Performance of Earth Dams During Earthquakes, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, retrieved from internet: <https://trid.trb.org/view/74404>, **104**(GT7).
- Sianko, I., Ozdemir, Z., Khoshkholghi, S., Garcia, R., Hajirasouliha, I., Yazgan, U., and Pilakoutas, K. (2020): A practical probabilistic earthquake hazard analysis tool: case study Marmara region, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **18**(6), 2523–2555. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00793-4>
- USSD Committee on Earthquakes (1992): *Observed Performance of Dams During Earthquakes Volume I*, USSD, Denver.
- USSD Committee on Earthquakes (2000): *Observed Performance of Dams During Earthquakes Volume II*, USSD, Denver.
- USSD Committee on Earthquakes (2014a): *Observed Performance of Dams During Earthquakes Volume III*.
- Wahlstrom, E. E. (1974): Dams, dam foundations and reservoir sites, 278.