

ANALISIS RESIKO GEMPA BENDUNGAN LEUWIKERIS, PROVINSI JAWA BARAT

[SEISMIC HAZARD ANALYSIS LEUWIKERIS DAM, WEST JAVA PROVINCE]

Fioliza Ariyandi^{1*}, Muhammad Riza Harahap²

¹ Sekolah Pascasarjana Universitas Katolik Parahyangan, Bandung-Indonesia

² Geotechnical Engineer, PT. Bima Sakti Geotama, Bandung-Indonesia

*Korespondensi penulis : f.ariyandi.81@gmail.com

ABSTRACT

One of the dams in West Java is Leuwikeris Dam is being planned. It required an assessment in the form of seismic hazard analysis on Leuwikeris Dam. In this paper seismic hazard analysis was performed using probabilistic and deterministic methods. Where seismic events in the repeat periods of 145, 475 and 10000 years are considered in seismic hazard analysis by probabilistic methods. While the spectra target selection is based on CMS (Conditional Mean Spectrum). The results of this study show the design criteria for seismic risk Leuwikeris Dam on condition Operating Basis Earthquake (OBE) and Safety Evaluation Earthquake (SEE) in the form of acceleration time history. In short spectra $t = 0.2$ seconds value peak ground accelerations (PGA), respectively for 0,23g, 0,30g and 0,54g, while in the long spectra period $t = 1.0$ seconds value of peak ground accelerations (PGA) respectively of 0.16g, 0.19g and 0.26g, which will be used as input in conducting a dynamic analysis of Leuwikeris Dam.

Keywords : Dam, seismic hazard, CMS, acceleration of time history

ABSTRAK

Salah satu bendungan di Jawa Barat yaitu Bendungan Leuwikeris sedang direncanakan. Untuk itu diperlukan suatu kajian berupa analisis resiko gempa (*seismic hazard analysis*) pada Bendungan Leuwikeris. Di dalam paper ini analisis resiko gempa dilakukan menggunakan metode probabilistik dan deterministik. Dimana kejadian gempa pada periode ulang 145, 475 dan 10.000 tahun dipertimbangkan pada analisis resiko gempa dengan metode probabilistik. Sedangkan pemilihan target spektra dilakukan berdasarkan CMS (*Conditional Mean Spectrum*). Hasil dari studi ini menampilkan kriteria disain resiko gempa Bendungan Leuwikeris pada kondisi *Operating Basis Earthquake* (OBE) dan *Safety Evaluation Earthquake* (SEE) berupa percepatan riwayat waktu. Pada spectra pendek $t = 0,2$ detik nilai *peak ground accelerations* (PGA) berturut-turut sebesar 0,23g, 0,30g dan 0,54g, sedangkan pada periode spectra panjang $t = 1,0$ detik nilai *peak ground accelerations* (PGA) berturut-turut sebesar 0,16g, 0,19g dan 0,26g, yang akan digunakan sebagai input dalam melakukan analisis dinamik Bendungan Leuwikeris.

Kata kunci : Bendungan, seismic hazard, CMS, percepatan riwayat waktu

PENDAHULUAN

Untuk memenuhi kebutuhan air irigasi, pengendalian banjir, penyediaan air baku dan penyediaan energi listrik, BBWS

Citanduy memandang perlu untuk membangun Bendungan Leuwikeris yang berlokasi di Sungai Citanduy, Desa Ancol, Kecamatan Cineam, Kabupaten Tasikmalaya,

Provinsi Jawa Barat dengan daerah tangkapan seluas 48.000 Ha, volume tampungan 80.500.000 m³. Lokasi rencana Bendungan Leuwikeris berada disekitar sesar-sesar aktif di Pulau Jawa terutama Sesar Citanduy yang berjarak ± 25 km dari lokasi bendungan dan memiliki *slip rate* ± 30 mm/year (Abidin, et al, 2009). Oleh karena itu untuk mengurangi dampak kerusakan dan memprediksi pengaruh sesar aktif Citanduy terhadap berbagai konstruksi Bendungan Leuwikeris, maka perlu dilakukan kajian berupa analisis resiko gempa (*seismic hazard analisis*) dilokasi Bendungan Leuwikeris.

Analisis resiko gempa yang dilakukan mencakup *probabilistik seismic hazard analysis* (PSHA) untuk periode ulang 145, 475 dan 10.000 tahun serta *deterministik seismic hazard analysis* (DSHA). Sedangkan pemilihan target spektra dilakukan berdasarkan *Conditional Mean Spectrum* (CSM) untuk pembuatan *ground motion* sintetik juga dilakukan pada studi ini. Hasil dari studi ini akan menampilkan kriteria disain resiko gempa Bendungan Leuwikeris pada kondisi *Operating Basis Earthquake* (OBE) dan *Safety Evaluation Earthquake* (SEE) berupa percepatan riwayat waktu (*acceleration time histories*) yang berguna sebagai input analisis dinamik Bendungan Leuwikeris.

BAHAN DAN METODE

Bahan Penelitian

Pemodelan seismotektonik atau pemodelan zona sumber gempa diperlukan sebagai penghubung antara data kejadian gempa dengan model perhitungan yang digunakan dalam menentukan tingkat resiko gempa. Zona sumber gempa didefinisikan sebagai area yang mempunyai derajat gempa yang sama, dimana setiap titik dalam zona tersebut mempunyai kemungkinan yang sama akan terjadinya gempa dimasa yang akan datang. Model sumber gempa akan memberikan gambaran distribusi episenter kejadian gempa historik, frekwensi kejadian gempa dan pergesaran relatif lempeng (*slip rate*) dari suatu sumber gempa. Umumnya pemodelan sumber gempa dapat dirangkum menjadi 4 (empat) langkah prosedur pemodelan sumber gempa. Berikut adalah langkah-langkah yang dilakukan :

1. Penentuan lokasi sumber gempa
2. Penentuan dimensi sumber gempa
3. Pendefinisian mekanisme dan orientasi sumber gempa
4. Penentuan tingkat aktifitas sumber gempa.

Langkah 1 sampai 3 dilakukan berdasarkan data distribusi kejadian gempa dan tatanan seismotektonik di daerah sekitar bendungan Leuwikeris. Orientasi sumber

gempa yang dipertimbangkan tidak hanya arah/sudut strike tapi juga arah/sudut dip.

Langkah 4 (empat) dilakukan dengan menilai dan mengevaluasi parameter *seismic hazard* untuk semua zona sumber gempa. Parameter *seismic hazard* diwakili oleh hubungan frekuensi kejadian gempa dengan magnitude (nilai parameter a-b dan magnitude maksimum).

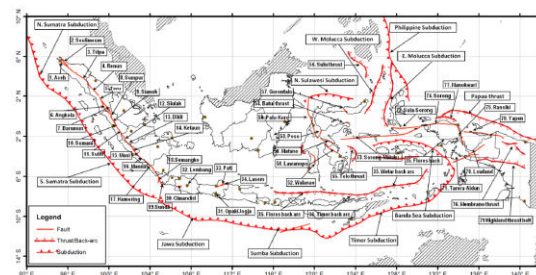
Sebelum melakukan *seismic hazard analysis*, evaluasi lengkap terhadap seluruh data gempa yang telah tersedia perlu dilakukan. Langkah selanjutnya seperti pengumpulan dan pengolahan data gempa, pemodelan seismotektonik, penentuan *b-value* dan analisis *annual rate*, penentuan magnitude maksimum dan penentuan fungsi attenuasi perlu dilakukan.

Sumber gempa di Indonesia diklasifikasikan dalam tiga Zona sumber gempa, yaitu :

1) Zona subduksi, yaitu zona kejadian gempa yang terjadi didekat batas pertemuan antara lempeng samudra yang menujam masuk ke bawah lempeng benua. Kejadian gempa akibat *thrust fault*, *normal fault*, *reverse slip* dan *strike slip* yang terjadi sepanjang pertemuan lempeng dapat diklasifikasikan sebagai zona subduksi.

- 2) Zona transformasi, yaitu zona kejadian gempa *strike-slip* yang terjadi pada patahan-patahan yang terdefinisi dengan jelas, seperti sesar Sumatra.
- 3) Zona *diffuse seismic*, yaitu kejadian gempa yang tidak termasuk dalam dua klasifikasi diatas.

Adapun kondisi tektonik utama diseluruh Indonesia dapat dirangkum pada Gambar 1.



Gambar 1. Kondisi tektonik utama di Wilayah Indonesia

(Sumber : Tim revisi peta gempa Indonesia, 2010)

Untuk melakukan analisis *seismic hazard* resiko gempa, dibutuhkan data seluruh kejadian gempa yang terjadi disekitar lokasi studi dalam rentang waktu pengamatan tertentu. Pada studi ini, data kejadian gempa yang terjadi disekitar wilayah studi dikumpulkan berdasarkan gabungan dari beberapa sumber katalog gempa. Data gempa yang dikumpulkan pada studi ini adalah data kejadian gempa dalam cakupan area 10° LU hingga 12° LS dan 90° BT hingga 145° BT, dengan minimum magnitude $M_w = 5$ dan kedalaman maksimum 300 km dalam rentang

waktu tahun 1900-2014. Data kejadian gempa dikumpulkan dari katalog gempa Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Indonesia, *National Earthquake Information Center U.S Geological Survey* (NEIC-USGS, PDE), *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dan *Advanced National Seismic System* (ANSS). Umumnya data yang berasal dari katalog gempa memiliki magnitude yang tidak seragam, mengandung data gempa utama (*main shock*) dan data gempa susulan (*after shock*) serta data kejadian gempa-gempa kecil yang umumnya tidak lengkap dibandingkan dengan data kejadian gempa-gempa besar. Sebelum digunakan dalam analisis resiko gempa, data gempa harus dikoreksi dan diolah terlebih dahulu. Pengolahan data kejadian gempa meliputi; (1) Konversi skala magnitude, (2) Pemisahan gempa utama dan susulan (*analysis dependency*) dan, (3) Analisa kelengkapan data (*completeness*).

ZMAP merupakan perangkat lunak berupa *graphical user interface* (GUI), untuk membantu menganalisis pemisahan gempa utama dengan gempa sebelum dan sesudah terjadi gempa utama. Pemisahan data gempa utama dilakukan dengan menggunakan kriteria *time window* dan kriteria *distance windows* dari Gardner dan Knopoff (1974). Analisis kelengkapan data juga dapat

dilakukan dengan bantuan perangkat lunak ZMAP.

EZ-FRISK merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan analisis bahaya gempa terhadap lokasi yang lebih spesifik, dimana kemampuan utama EZ-FRISK adalah :

- *Seismic Hazard Analysis* : menghitung kemungkinan guncangan gempa bumi di permukaan atau di batuan dasar di bawah lokasi berdasarkan lokasi patahan sekitarnya.
- *Spectral Matching* : menyesuaikan *accelerogram* agar sesuai dengan target *response spectrum*, sambil mempertahankan karakteristik gerakan tanah yang bergantung pada waktu.
- *Site Response Analysis* : menghitung gerakan tanah di permukaan yang diberikan *ground motion* batuan dasar

Metode Penelitian

Konversi Skala Magnitude

Data gempa yang diambil dari berbagai katalog terdiri dari skala yang berbeda-beda, untuk menstarakan ukuran skala yang berbeda-beda, baik yang menggunakan ukuran skala *body wave magnitude* (M_b), *surface wave magnitude* (M_s), *Richter local magnitude* (M_L), atau *moment magnitude* (M_w) perlu dilakukan konversi dari berbagai ukuran skala tersebut

menjadi satu skala magnitudo yang sama sebelum digunakan dalam analisis resiko gempa. Pada studi ini korelasi konversi magnitudo yang digunakan adalah korelasi berdasarkan hasil studi tim revisi peta gempa Indonesia 2010 yang didapat berdasarkan analisis regresi dari data-data gempa di wilayah Indonesia seperti Tabel 1.

Tabel 1. Korelasi konversi skala magnitudo untuk wilayah Indonesia

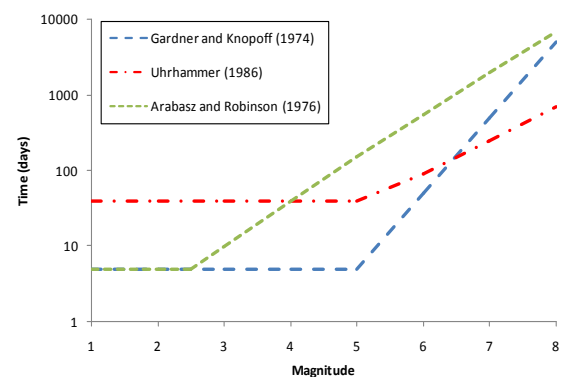
Korelasi Konversi
$M_w = 0.143M_s^2 - 1.051M_s + 7.285$
$M_w = 0.114m_b^2 - 0.55m_b + 5.560$
$M_w = 0.1787ME + 1.537$
$m_b = 0.125M_L^2 - 0.389M_L + 3.513$

(Sumber : Tim revisi peta gempa Indonesia 2010)

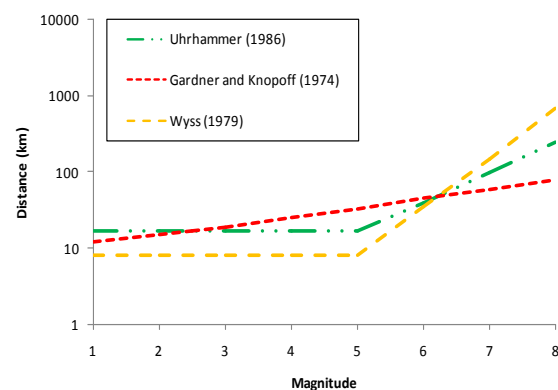
Pemisahan Gempa Utama dan Gempa Susulan (*Analisis Dependency*)

Analisis resiko gempa terutama probabilistik *seismic hazard analysis* dilakukan berdasarkan kejadian gempa utama (*main shock*) sehingga kejadian-kejadian gempa awalan/susulan (*foreshock/aftershock*) yang terjadi dalam suatu rangkaian kejadian gempa harus diidentifikasi sebelum dilakukan analisis resiko gempa. Memasukkan kejadian gempa awalan/susulan dalam analisis akan mengakibatkan sedikit peningkatan hasil analisis *seismic hazard* (Pacheco dan Sykes, 1992). Beberapa kriteria empiris telah diajukan oleh beberapa peneliti untuk mengidentifikasi kejadian-kejadian gempa susulan, Gardner dan Knopoff (1974), dan

Uhrhammer (1986). Kriteria ini digunakan untuk mengidentifikasi kejadian gempa yang berhubungan dengan *fault rupture*. Kriteria ini didasarkan atas suatu rentang waktu dan jarak tertentu dari suatu kejadian gempa utama dalam suatu rangkaian kejadian gempa. Suatu gempa dikatakan gempa susulan jika berada didalam rentang waktu dan jarak yang dihitung menurut kriteria empiris untuk suatu magnitudo gempa tertentu seperti terlihat pada gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Kriteria *time windows* untuk analisis pemisahan gempa utama



Gambar 3. Kriteria *distance windows* untuk analisis pemisahan gempa utama

Analisis Kelengkapan Data Gempa (*Analysis Completeness*)

Data pencatatan kejadian gempa historis untuk kejadian-kejadian gempa besar lebih lengkap dibanding kejadian-kejadian gempa kecil. Hal ini disebabkan oleh masih sedikitnya alat pencatat gempa pada masa awal pengamatan, sehingga alat-alat tersebut hanya mencatat kejadian-kejadian gempa besar saja. Selain itu, kejadian-kejadian gempa kecil tidak terdeteksi di beberapa lokasi karena alasan fisik dan demografi. Ketidaklengkapan data akan memberikan hasil yang terlalu kecil (*underestimated*) untuk gempa-gempa kecil dan terlalu besar (*overestimated*) untuk kejadian gempa besar terutama pada saat penentuan parameter a-b dan analisis probabilistik. Sehingga perlu dilakukan analisa kelengkapan (*completeness*) dengan langkah-langkah sebagai berikut :

- 1) Waktu pengamatan dibagi atas beberapa interval waktu (T) yang dihitung dari pengamatan terakhir ke belakang
- 2) Untuk setiap interval waktu (T), data gempa dibagi atas beberapa rentang magnitude dan dihitung banyaknya kejadian gempa untuk setiap rentang magnitude (N).
- 3) Frekuensi kejadian gempa (*rate*) untuk setiap rentang magnitude dihitung

menggunakan rumus sebagai berikut $\lambda = \Sigma N/T$

- 4) Standart deviasi untuk setiap interval dihitung dengan rumus $\sigma = \frac{\sqrt{\lambda}}{T}$

Kelengkapan data pada suatu perioda waktu tertentu dapat dilihat dari gradien kecenderungan data yang berubah. Rentang waktu dimana standar deviasi menunjukkan perubahan dan menjadi lebih curam menunjukkan data gempa yang tidak lengkap.

Analisis resiko gempa (*seismic hazard analysis*) dilakukan untuk memberikan estimasi kuantitatif dari guncangan gempa pada suatu lokasi tertentu. *Seismic hazard analisis* dilakukan dengan menghubungkan kondisi seismotektonik dan kejadian gempa sehingga menghasilkan parameter disain gempa untuk keperluan analisis dinamik suatu struktur. Analisis resiko gempa dapat dilakukan dengan 2 (dua) metode pendekatan yaitu : metode analisis resiko gempa probabilistik (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis/PSHA*) dan metode analisis resiko gempa deterministik (*Deterministik Seismic Hazard Analysis/DSHA*).

Metode Probabilistik memprediksi kemungkinan apakah ground motion atau percepatan gempa yang terjadi akan sama atau dapat melampaui nilai tertentu selama rentang waktu tertentu. Sementara metode

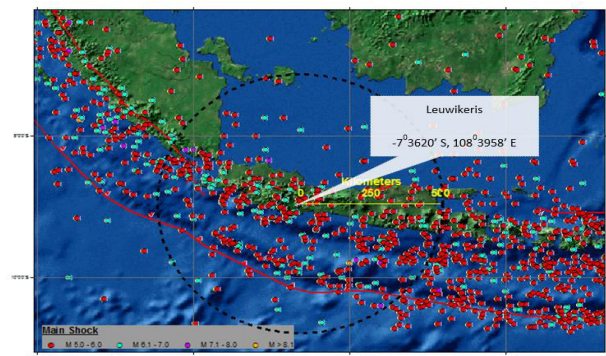
deterministik menggunakan ketersediaan data sejarah kejadian gempa dengan besaran tertentu pada lokasi tertentu untuk memprediksi percepatan gempa yang mungkin terjadi. Analisis deterministik menggunakan konsep *maximum credible earthquake* (MCE), dimana nilai percepatan gempa ditentukan berdasarkan kejadian gempa terbesar yang mungkin terjadi akibat suatu sumber gempa tertentu.

Conditional Mean Spectrum (CMS)

Nilai CMS dihitung berdasarkan deagregasi PSHA dengan cara menghitung bobot rata-rata CMS yang telah dinormalisasi pada semua sumber gempa. Bobot pada setiap sumber gempa diperoleh berdasarkan kontribusinya terhadap deagregasi. Bobot rata-rata CMS yang telah dinormalisasi, sehingga nilainya sama persis dengan amplitudo yang digunakan untuk deagregasi pada periode spektra yang diinginkan. Umumnya rata-rata epsilon, jarak dan magnitude untuk sumber tertentu dapat sangat berbeda dengan rata-rata epsilon, jarak dan magnitude hasil deagregasi. Perata-rataan amplitudo CMS dilakukan berdasarkan rata-rata aritmatika dan bukan berdasarkan rata-rata geometrik.

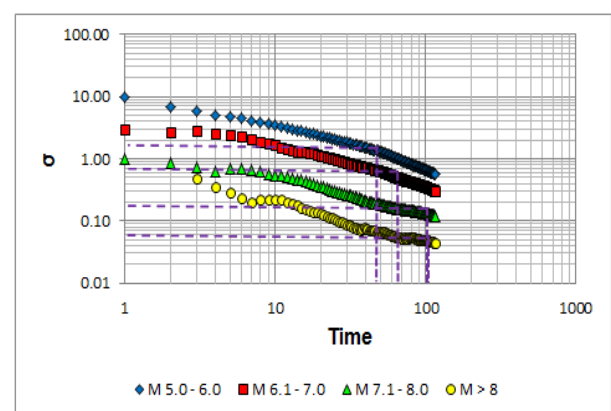
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis *depedancy* yang memisahkan antara gempa utama dengan gempa susulan, dari 67.934 kejadian gempa yang berhasil dikumpulkan didapat 5.754 kejadian gempa yang merupakan gempa utama (*main shock*).



Gambar 4. Distribusi kejadian gempa utama dalam radius 500 km dari wilayah studi

Sementara hasil analisis *completeness* (analisis kelengkapan) menunjukkan hasil sebagai berikut :



Gambar 5. Hasil analisa *completeness* terhadap data kejadian gempa

Berdasarkan data yang telah dikumpulkan dapat diketahui bahwa untuk rentang magnitudo $5,0 < M_w \leq 6,0$ terlihat bahwa data gempa lengkap selama 47 tahun, rentang magnitudo $6,1 < M_w \leq 7,0$ terlihat bahwa data gempa lengkap selama 56 tahun, rentang magnitudo $7,1 < M_w \leq 8,0$ terlihat bahwa data gempa lengkap selama 106 tahun, dan rentang magnitudo $M_w > 8,0$ terlihat bahwa data gempa lengkap selama 111 tahun.

Hasil *probabilistic seismic hazard analysis* yang dihitung telah dilakukan terhadap lokasi Bendungan Leuwikeris, Kabupaten Tasikmalaya, Provinsi Jawa Barat dengan koordinat $7^{\circ} 21' 43,17''$; S, $108^{\circ} 23' 44,70''$ E, dapat diketahui bahwa nilai *peak ground accelerations* (PGA) untuk periode ulang 145, 475 dan 10.000 tahun pada periode spectra pendek $t = 0,2$ detik berturut-turut sebesar 0,23g, 0,30g dan 0,54g. Sedangkan pada periode spectra panjang $t = 1,0$ detik berturut-turut sebesar 0,16g, 0,19g dan 0,26g.

Dengan metode *deterministic seismic hazard analysis* (DSHA) dan telah mempertimbangkan potensi terbesar sumber gempa yang mempengaruhi lokasi Bendungan Leuwikeris, Kabupaten Tasikmalaya, Provinsi Jawa Barat, yaitu akibat *shallow background* dengan magnitudo $M_w = 6,49$ dan jarak 30,00 km dari lokasi studi dengan nilai percepatan maksimum dibatuan dasar/*Peak Ground*

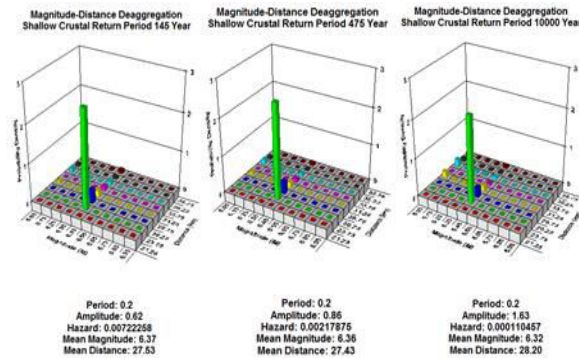
Acceleration (PGA) pada 50th and 84th percentile berturut-turut sebesar 0,31g dan 0,54g.

Berdasarkan ketentuan ASCE/SEI 7-10 (ASCE, 2010), pemilihan jumlah input *ground motion* yang akan digunakan pada analisis dinamik *time history* minimal diperlukan 3 (tiga) rekaman data *ground motion*. Jika sekurang-kurangnya ada 7 rekaman *ground motion* yang dianalisis, disain *value* dari *engineering demand parameters* (EDPs) diambil sebagai nilai rata-rata dari EDPs. Sedangkan jika kurang dari 7 rekaman *ground motion* yang dianalisis, maka disain *value* dari EDPs diambil sebagai nilai maksimum dari EDPs.

Hasil analisa deagregasi dilakukan dilokasi rencana Bendungan Leuwikeris untuk memperlihatkan nilai kisaran jarak (R) dan magnitudo (M) rata-rata yang memberikan kontribusi terbesar dari sumber gempa tertentu pada lokasi studi. Nilai kisaran jarak dan magnitudo ini yang kemudian akan menjadi landasan dalam mencari input *accelerometer* yang memiliki karakteristik yang mendekati kondisi yang diinginkan dan kemudian digunakan sebagai salah satu input dalam analisa *spectral matching*.

Tabel 2. Rangkuman hasil deagregasi

Mekanisme Gempa	Periode Ulang 145 Tahun				Periode Ulang 10000 Tahun			
	Periode Spectra							
	0.2 sec		1.0 sec		0.2 sec		1.0 sec	
	M _{controlling} (mw)	R _{controlling} (km)	M _{controlling} (mw)	R _{controlling} (km)	M _{controlling} (mw)	R _{controlling} (km)	M _{controlling} (mw)	R _{controlling} (km)
All Source	6.39	28.77	6.51	32.94	6.34	29.20	6.69	42.44
Shallow Crustal	6.37	27.53	6.43	26.83	6.32	28.20	6.43	26.06
Benioff	6.31	135.54	6.41	142.81	7.04	97.08	7.24	102.03
Megathrust	7.47	176.04	7.47	191.85	7.77	111.83	7.80	121.61

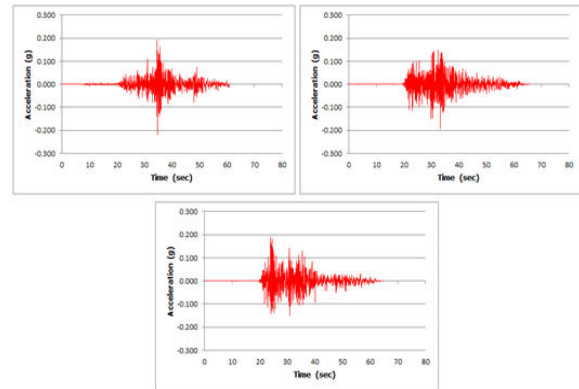


Gambar 6. Kurva deagregasi

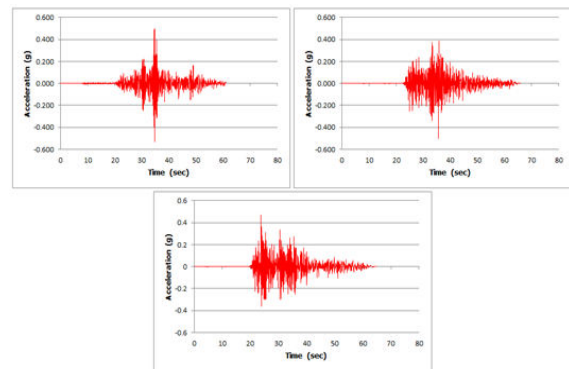
Adapun karakteristik *input motion* yang akan digunakan pada analisa *spectra matching* untuk mendapatkan *ground motion* sintetik dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Karakteristik *ground motion* yang digunakan dalam analisa *spectral matching*

Quake event	Magnitude (mw)	Distance (km)
Chi-chi Taiwan-05 HWA 002, 1999	6.2	20 - 50
Chi-chi Taiwan-06 HWA 002, 1999	6.3	
Chi-chi Taiwan-03 TCU 102, 1999	6.2	
El Mayor Cucapah, Big Chuckawalla, 2010	7.2	85 - 145
El Mayor Cucapah, Glamis Black Mountain, 2010		
El Mayor Cucapah, Anza Pinyon Flat, 2010		



Gambar 7. Usulan *ground motion* sintetik utk AEP 1:145



Gambar 8. Usulan *ground motion* sintetik utk AEP 1:10000

KESIMPULAN

Sumber gempa yang memberikan kontribusi terbesar terhadap total kejadian gempa per tahun pada lokasi Bendungan Leuwikeris adalah sumber gempa *shallow background*.

Berdasarkan metode *probabilistic seismic hazard analysis* (PSHA) nilai *peak ground accelerations* (PGA) untuk periode ulang 145, 475 dan 10.000 tahun pada periode

spectra pendek $t = 0,2$ detik berturut-turut sebesar 0,23g, 0,30g dan 0,54g. Sedangkan pada periode spectra panjang $t = 1,0$ detik berturut-turut sebesar 0,16g, 0,19g dan 0,26g. Sedangkan berdasarkan metode *deterministic seismic hazard analysis* (DSHA), nilai *peak ground acceleration* (PGA) pada 50th and 84th percentile berturut-turut sebesar 0,31g dan 0,54g.

Administration. Technical Report ERL 267-ESL 30 : 16-28.

Tim Revisi Peta Gempa Indonesia. 2010. Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia. Tim Revisi Peta Gempa Indonesia, Bandung.

Uhrhammer, R. 1986. Characteristics of northern and central California seismicity, *Earthquake Notes* 57 (1) : 21-37.

DAFTAR PUSTAKA

American Society Of Civil Engineers (ASCE). 2010. Minimum design load for buildings and other structures. ASCE Standart 7-10, Reston, Virginia.

Donald L. Wells and Kevin J. Coopersmith. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America* 84 (4) : 974-1002.

Gardner, J. K. and Knopoff, L. 1974. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian. *Bulletin of the Seismological Society of America* 64 : 1363-1367.

Pacheco, J. and Sykes, L.R. 1992. Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989. *Bulletin of the Seismological Society of America* 82 : 1306-1349.

Stepp, J. C. 1973. Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area. In Harding, S. T. (Eds). *Contributions to seismic zoning, US National Oceanic and Atmospheric*