

ANALISIS RESPONS TANAH DI PERMUKAAN PADA BEBERAPA LOKASI PENGEBORAN DANGKAL STASIUN GEMPA BADAN METEOROLOGI KLIMATOLOGI DAN GEOFISIKA (BMKG)

Ground Response Analysis at Surface on Some Shallow Boring at Meteorology Climatology and Geophysic Agency (BMKG) Stations

Mohamad Ridwan¹, Fahmi Aldiamar²

¹Pusat Litbang Perumahan dan Pemukiman, Badan Litbang, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jl. Panyawungan Cileunyi Wetan Kabupaten Bandung 40393.

²Pusat Litbang Jalan dan Jembatan, Badan Litbang, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jl. A.H. Nasution No. 264, Bandung, 40294.

Surel: ¹m.ridwan@pu.go.id, ²fahmi.aldiamar@pusjatan.pu.go.id

Diterima: 04 April 2017; Disetujui: 20 Mei 2017

Abstrak

Analisis hazard gempa untuk wilayah Indonesia sudah disusun dalam peraturan gempa Indonesia (SNI-1726-2012) untuk Peak Ground Acceleration (PGA) dan spektrum respons dibatuan dasar, sedangkan aplikasi untuk disain struktur harus dihitung dipermukaan dengan mempertimbangkan efek tanah lokal. Analisis respon spesifik site dapat dilakukan dengan menggunakan analisis perambatan gelombang dari batuan dasar ke permukaan berdasarkan input parameter tanah dan goyangan di batuan dasar. Pada penelitian ini dilakukan analisis respon spesifik situs pada empat lokasi yang telah diketahui kondisi tanahnya berdasarkan hasil uji pengeboran dan Standard Penetration Test (SPT) yaitu di Serang, Sukabumi, Cilacap, dan Wonogiri yaitu lokasi stasiun seismograf milik Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Hasil analisis pada seluruh lokasi tersebut diperoleh spektrum respons dipermukaan pada periode 1,0 detik terjadi amplifikasi, sedangkan pada PGA dan spektrum respons 0,2 detik terjadi deamplifikasi. Bila dibandingkan dengan ASCE-07-10 untuk jenis tanah sedang (SD) memperlihatkan nilai amplifikasi hasil penelitian yang lebih rendah. Hal ini tentunya akan menjadi bahan kajian dan evaluasi lebih lanjut untuk kebutuhan praktis.

Kata Kunci: Hazard gempa, respons tanah, spesifik situs, amplifikasi, spektrum respons

Abstract

Seismic hazard analysis for the entire Indonesia region has been prepared in the Indonesian Nasional Standard (SNI-1726-2012) for PGA and spectral response seismic hazard map on bedrock. However, in the application for structural design, surface spectral response should be calculated considering effect of the local soil condition. Site specific response analysis can be conducted by using seismic wave propagation from the bedrock to the surface based on input soil parameters and motion on the bedrock. In this study, site specific response analysis was conducted at four field investigation locations i.e: Serang, Sukabumi, Cilacap, and Wonogiri which is the location of seismographs station belong to BMKG. Results of seismic hazard analysis on the surface shows that the spectral response at 1,0 second period was amplified, while the PGA and at 0,2 second period decreased associated with deamplification, while in comparison with medium soil (SD) classification from ASCE-07-10, the amplification factors in the study are lower.

Keywords: Seismic hazard, ground response, site specific, amplification, response spectra

PENDAHULUAN

Wilayah kepulauan Indonesia memiliki kondisi tektonik yang sangat kompleks karena terletak di daerah pertemuan beberapa lempeng tektonik aktif sehingga menyebabkan wilayah ini mempunyai aktifitas kegempaan yang sangat tinggi. Ada beberapa lempeng tektonik besar yang mempengaruhi kondisi tektonik wilayah Indonesia

yaitu Hindia-Australia, Sunda, Pasifik, dan Philipina seperti terlihat pada Gambar 1 (Bock et al. 2003) dimana masing-masing lempeng bergerak pada arah yang berlainan sehingga terjadi pertemuan antar lempeng yang dikenal dengan pola subduksi. Jalur subduksi ini berada disepanjang pantai Barat pulau Sumatera dan Selatan Pulau Jawa sampai Nusa Tenggara Timur yang dikenal busur Sunda,

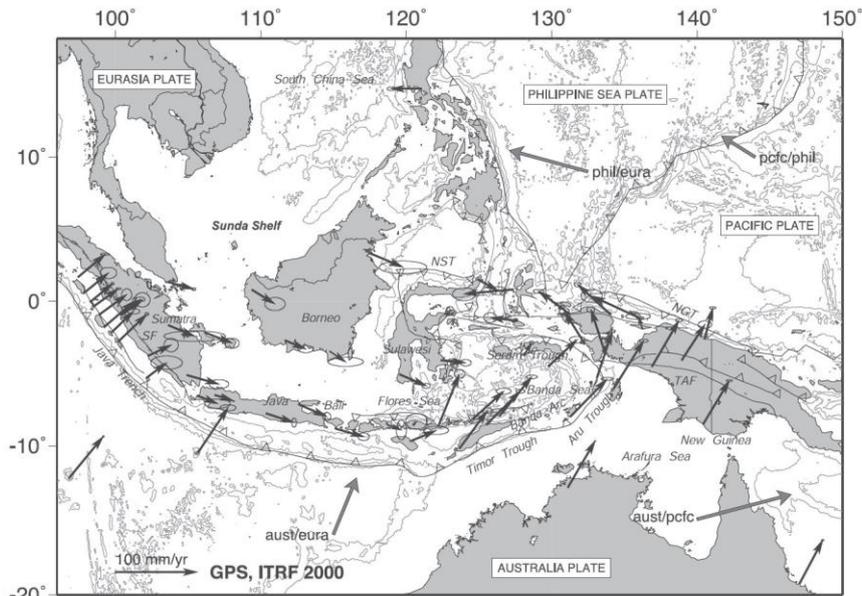
selanjutnya menerus sampai kepulauan Maluku yang dikenal sebagai busur Banda. Selain adanya jalur subduksi di lautan, juga terjadi sesar-sesar di daratan akibat aktivitas pergerakan lempeng tektonik yang aktif bergerak secara terus menerus.

Berdasarkan catatan sejarah kegempaan yang pernah terjadi di Indonesia dan pernah dilaporkan sejak tahun 1900, distribusi episentrum gempa berada pada jalur-jalur sumber gempa yaitu: di lautan yang berasosiasi dengan zona subduksi dan juga di daratan yang berasosiasi dengan sesar-sesar dangkal. Seluruh catatan kejadian gempa ini menunjukkan bahwa wilayah Indonesia memiliki aktivitas kegempaan yang sangat tinggi dan tentunya diperlukan tindakan mitigasi sebagai upaya untuk mengurangi dampak yang ditimbulkannya. Salah satu bagian dari program mitigasi bencana gempa bumi adalah menganalisis tingkat bahaya (*hazard*), baik di level batuan dasar maupun dipermukaan, dengan memperhitungkan seluruh data kejadian gempa dan kondisi geologi lokal. Hal ini, sangat berguna bagi perkembangan ilmu kegempaan maupun terapan.

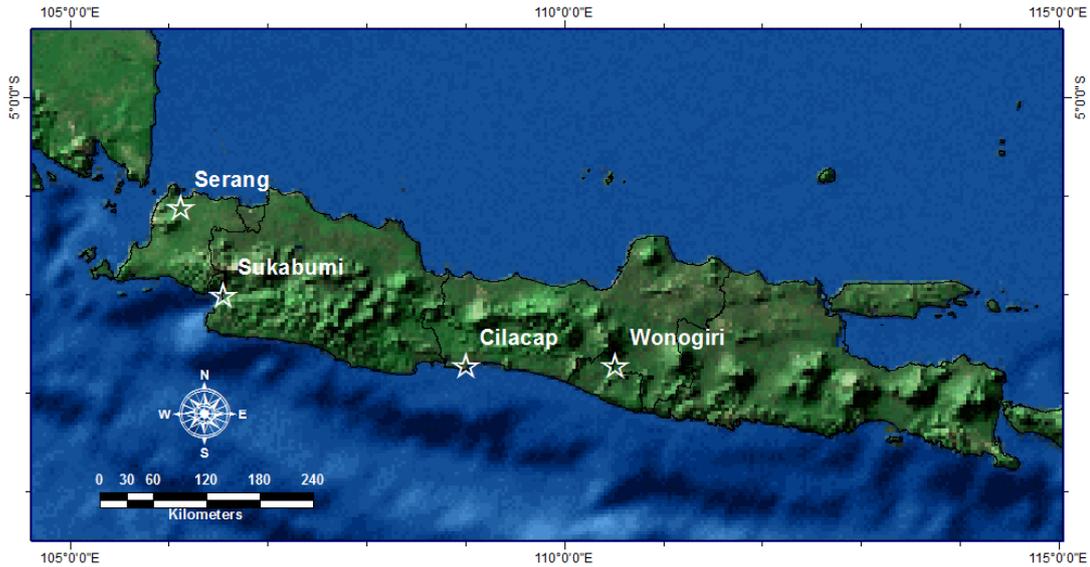
Seperti yang telah terjadi dalam berbagai kasus kejadian gempa bumi, dampak yang ditimbulkan oleh setiap kejadian gempa tentunya beragam, karena goyangan gempa yang terjadi di permukaan tanah selain dipengaruhi oleh jarak dan kekuatan

gempa, juga dipengaruhi oleh kondisi tanah setempat dimana hal ini terkait dengan fenomena amplifikasi gelombang gempa yang dipengaruhi oleh jenis dan ketebalan lapisan tanah/sedimen yang berada di atas batuan dasar. Kuantifikasi faktor amplifikasi yang terjadi pada suatu lokasi kajian menjadi permasalahan utama untuk mengetahui respons tanah permukaan (*ground response*) terhadap gelombang gempa dimana salah satu pendekatan yang dapat dilakukan adalah dengan metode analisis respons spesifik situs

Tulisan ini menyajikan dan membahas hasil analisis respons spesifik situs dengan menggunakan metode analisis perambatan gelombang 1D dengan memasukkan parameter-parameter tanah hasil pengeboran dangkal sampai kedalaman 30 m yang diikuti dengan pengujian *Standard Penetration Test* (SPT). Pada dasarnya pengujian tanah akan lebih baik dilakukan pada seluruh stasiun gempa, tetapi karena pertimbangan biaya dan waktu maka pada tulisan ini dibahas pada 4 lokasi yang mewakili Jawa Barat dan Jawa Tengah. Lokasi-lokasi tersebut adalah stasiun pengamatan gempa milik BMKG yaitu: Serang, Sukabumi, Cilacap, dan Wonogiri (Gambar 2). Pemilihan lokasi tersebut didasarkan atas beberapa pertimbangan antara lain: data tanah hasil pengeboran dapat dijadikan sebagai referensi dan verifikasi untuk data gempa bumi yang tercatat pada lokasi tersebut jika terjadi gempa-gempa besar.



Gambar 1 Peta Kerangka Tektonik Indonesia
 Sumber: (Bock dkk., 2003)



Gambar 2 Lokasi Kajian dan Pemboran Tanah Pada Stasiun Gempa BMKG

METODE

Merujuk kepada Irsyam dkk. (2007) dan Aldiamar (2007) secara umum analisis respons spesifik situs dilakukan dalam dua tahap, yaitu: (a) analisis *hazard* gempa di batuan dasar yang dihitung berdasarkan seluruh data sumber gempa dan data gempa historik yang pernah terjadi disekitar lokasi kajian dengan metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA), dan (b) analisis perambatan gelombang dari batuan dasar kepermukaan berdasarkan parameter-parameter tanah setempat hasil pengujian baik di lapangan maupun laboratorium, dan seleksi input goyangan gempa berdasarkan hasil analisis *deagregasi* seperti diilustrasikan pada Gambar 3. Adapun cara lain untuk kepentingan yang lebih praktis adalah dengan menggunakan tabel faktor amplifikasi yang telah disusun sesuai dengan jenis tanahnya (klasifikasi situs) dan nilai percepatan di batuan dasar yang telah dipublikasikan dalam beberapa referensi termasuk SNI-1726-2012.

Akuisisi Data

Pengumpulan data dilakukan dengan dua cara :

1. Pengumpulan data sekunder diambil dari berbagai sumber antara lain: hasil studi tim revisi peta gempa 2010 (Irsyam dkk. 2010) meliputi data historik gempa, peta kondisi tektonik, data sumber gempa dan parameter-parameternya, selain itu juga bersumber dari situs internet untuk rekaman gempa-gempa besar yang terjadi di luar negeri.
2. Pengumpulan data primer yang berupa pengujian tanah dilakukan langsung di lapangan. Pengujian tanah dilakukan dengan metoda pengeboran dan uji SPT sampai kedalaman 30 m, dan uji laboratorium untuk beberapa contoh tanah tidak terganggu.

Metode Analisis

Analisis bahaya (*hazard*) gempa di permukaan pada suatu lokasi kajian secara umum dilakukan dengan tahapan-tahapan sebagai berikut:

1. Identifikasi model sumber-sumber gempa disekitar lokasi tinjauan, terutama pada wilayah Pulau Jawa yang umumnya dipengaruhi oleh aktivitas subduksi dan sesar-sesar aktif yang berada di daratan.
2. Perhitungan parameter gempa pada setiap zona sumber gempa yang ditentukan berdasarkan data kejadian gempa historik dan kondisi tektonik yang meliputi: a-b parameter (Gutenberg dan Richter 1944) yang menunjukkan jumlah kejadian gempa per tahun untuk suatu nilai magnitude tertentu pada suatu zona sumber gempa, magnitude maksimum dan *slip rate* untuk setiap zona/segmen sumber gempa.
3. Penentuan fungsi atenuasi yang menggambarkan perambatan gelombang gempa dari lokasi sumber gempa ke suatu lokasi kajian merujuk kepada Asrurifak dkk. (2010) dan Irsyam dkk. (2010) untuk masing-masing model sumber gempa sebagai berikut:
 - a. Subduksi *Megathrust*:
 - Geomatrix *subduction* (Youngs dkk., 1997)
 - Atkinson dan Boore (2003) *rock and global source*
 - Zhao dkk. (2006)
 - b. Sesar dan *shallow background*:
 - Boore dan Atkinson NGA (2008)
 - Campbell dan Bozorgnia NGA (2008)
 - Chiou dan Youngs NGA (2008)
 - c. *Deep background*:
 - Atkinson dan Boore (2003) *intraslab seismicity*,

- *Geomatrix slab seismicity rock* (Youngs dkk. 1997)
 - Atkinson dan Boore (1995) *intraslab seismicity world data Rock condition*.
4. Analisis hazard gempa di batuan dasar dengan metoda *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) menggunakan Teori Probabilitas Total yang dikembangkan Mc Guire (1976) pada Kramer (1996) adalah sebagai berikut :

$$P[I \geq i] = \iint P[I \geq i; m, r] f_M(m) \cdot f_R(r) \cdot dm \cdot dr \quad \dots (1)$$

keterangan:

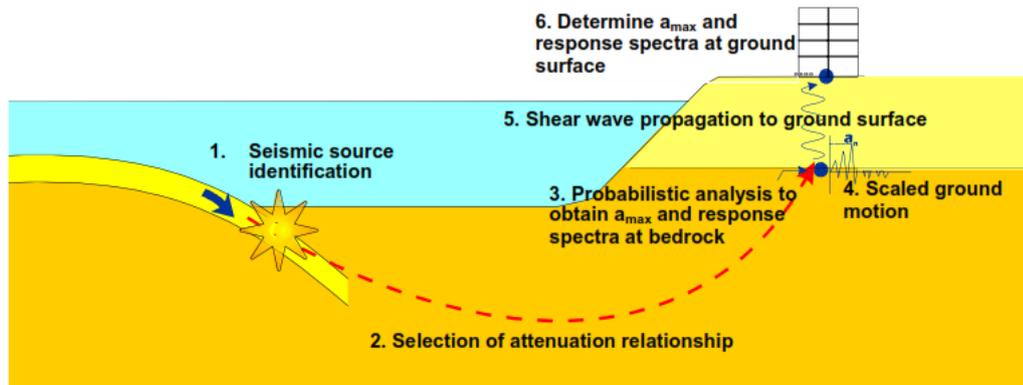
f_M = fungsi probabilitas dari magnitude

f_R = fungsi probabilitas dari jarak ke sumber

$P[I \geq i; m, r]$ = probabilitas berkondisi dari intensitas I yang sama atau lebih besar dari intensitas I di suatu lokasi dengan kekuatan gempa M dan jarak sumber R .

5. Karakterisasi situs berdasarkan hasil uji di lapangan maupun di laboratorium. Tes lapangan yang dilakukan adalah *Standard Penetration Test* (SPT), dan *Seismic Downhole Test* (SDT). Klasifikasi *site* ditentukan berdasarkan nilai

- NSPT, V_s , atau S_u untuk lapisan setebal 30 m (SNI-1726-2012) yang didasarkan atas korelasi hasil penyelidikan tanah lapangan dan laboratorium.
6. Analisis deagregasi dilakukan untuk mengetahui gempa yang paling berpengaruh terhadap suatu lokasi kajian berdasarkan nilai magnitude (M) dan jarak (R) yang paling dominan. Hal ini digunakan untuk pencarian data goyangan gempa (*motion*) yang sesuai untuk lokasi tersebut.
7. Penskalaan digitasi sintetik riwayat waktu yang dilakukan dengan menskalakan input goyangan yang memiliki karakteristik yang sama dengan hasil deagregasi terhadap target spektra. Metoda yang digunakan adalah *spectral matching analysis* (SMA) menggunakan software EZFRISK (Risk Engineering 2007) dengan mengadopsi metode *time-dependent spectral matching* yang dibuat oleh Abrahamson (1998).
8. Analisis respons spektra di permukaan dengan pendekatan analisis perambatan gelombang 1D berdasarkan data *motion* yang telah diskalakan dan dibuat digitasi data sintetik goyangan gempa (*motion*), dan input parameter tanah.



Gambar 3 Prosedur Analisis Spesifik Situs Menggunakan Metode PSHA
sumber: (Irsyam dkk., 2007)

HASIL DAN PEMBAHASAN

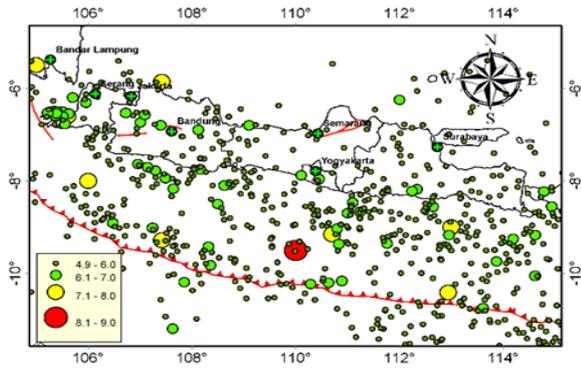
Untuk kepentingan proses analisis *hazard* gempa, sumber-sumber gempa di Indonesia yang sudah teridentifikasi dengan baik telah dikelompokkan ke dalam model sumber gempa subduksi (*megathrust*) dan sesar (*shallow crustal*) dengan merujuk tatanan tektonik wilayah Indonesia, sedangkan sumber-sumber gempa lainnya yang belum teridentifikasi dengan baik dapat dikelompokkan kedalam model gempa *background* (*shallow* dan *deep*) dan dianalisis dalam bentuk model *gridded seismicity*.

Katalog Gempa

Katalog gempa untuk kebutuhan analisis *hazard* gempa pada seluruh lokasi pengeboran di Pulau Jawa merujuk ke data yang digunakan oleh tim revisi peta gempa 2010 (Irsyam dkk., 2010) yang dikumpulkan dari berbagai sumber antara lain: *The Bureau Central*

International de Seismologie (BCIS), *International Seismological Summeries* (ISS), *International Seismological Center* (ISC), *Preliminary Determination of Epicenter* (PDE), Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Engdahl dkk. (2007) dan beberapa katalog perorangan.

Parameter magnitude gempa pada katalog tersebut selanjutnya diseragamkan dalam satuan momen magnitude (M_w) dan gempa utama (*main shock*) dipisah dari gempa susulan (*after shock*) menggunakan jendela kriteria terhadap jarak dan waktu menggunakan metode dari Gardner dan Knopov (1974). Berdasarkan hasil pengolahan data tersebut, distribusi episentrum gempa utama (*mainshock*) di sekitar Pulau Jawa diperlihatkan pada Gambar 4.



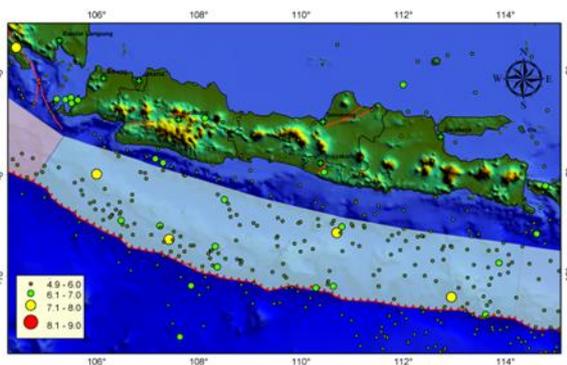
Gambar 4 Distribusi Episentrum Gempa Utama (*main shock*) di Sekitar Pulau Jawa dan Selat Sunda

Parameterisasi Sumber Gempa

Model sumber gempa subduksi.

Parameterisasi model sumber gempa subduksi disajikan dalam bentuk koordinat lintang dan bujur dari segmen subduksi, *a* dan *b-value* dari area subduksi yang diperoleh dari data gempa dengan metode *least square* (Gutenberg dan Richter, 1944) atau metode *Maximum Likelihood* (Aki 1965). Batas kedalaman untuk zona sumber gempa *Megathrust* adalah 50 km.

Gambar 5 memperlihatkan model segmen sumber gempa *Megathrust* Jawa dan episentrum gempa dengan kedalaman ≤ 50 Km, dan parameter gempa untuk segmen *Megathrust* Jawa ini yang digunakan dalam analisa *hazard* gempa diperlihatkan pada Tabel 1.



Gambar 5 Zona Subduksi (Segmen Jawa) dan Episentrum Gempa dengan Kedalaman ≤ 50 Km *sumber:* (Irsyam dkk., 2010)

Untuk sumber gempa yang lebih dalam (>50 km) daerah Benioff diwakili oleh model sumber gempa *deep background*.

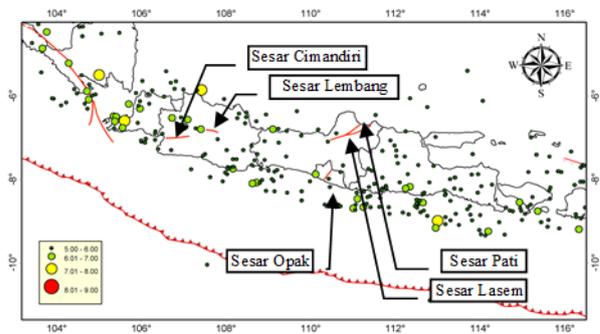
Tabel 1 Parameter Input *Megathrust*

Megathrust	<i>a value</i>	<i>b value</i>	M_{min}	M_{maks}
Segmen Jawa	6,14	1,1	7	8,1

Model sumber gempa sesar

Model sumber gempa sesar yang digunakan untuk analisis hazard adalah mengacu pada hasil studi tim revisi peta gempa 2010 (Irsyam dkk. 2010) seperti terlihat pada Gambar 6. Lokasi dan jenis sesar di Pulau Jawa yang sudah teridentifikasi dengan baik parameter-parameternya adalah sesar Cimandiri, Lembang, Opak, Pati, dan Lasem.

Input parameter model sumber gempa sesar untuk keperluan analisis probabilitas adalah: koordinat jalur sesar (*fault trace*) dalam lintang & bujur, mekanisme pergerakan sesar (*strike-slip, dip-slip*), laju geser (*slip-rate*), kemiringan bidang sesar (*dip*), dan panjang sesar (*length*). Penentuan lokasi sesar (*fault trace*) merujuk hasil studi terdahulu dari tim revisi peta gempa 2010 (Irsyam dkk. 2010) kemudian di *trace* ulang dengan menggunakan peta dasar *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM). Seluruh data sumber gempa sesar di Pulau Jawa dan parameter-parameternya yang digunakan dalam analisa *hazard* gempa diperlihatkan pada Gambar 6 dan Tabel 2.



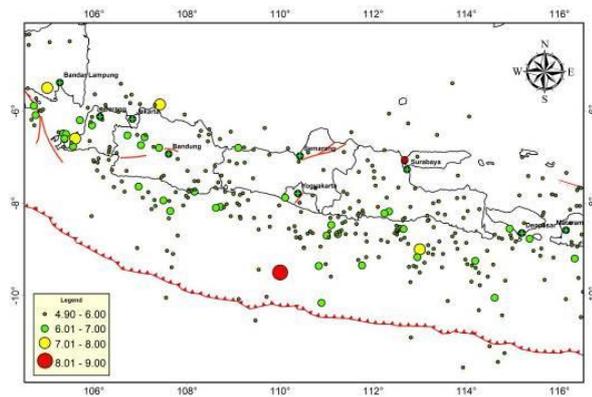
Gambar 6 Peta Lokasi Sumber Gempa Sesar dan Episentrum Gempa *Shallow Background* dengan Kedalaman ≤ 50 Km, *Sumber:* (Irsyam dkk. 2010)

Tabel 2 Parameter Input Sesar Model *Characteristic*

No.	Nama Sesar	Mekanisme	Batas atas (km)	Batas Bawah (km)	<i>Slip Rate</i> (mm/th)	M_{max}
1	Cimandiri	Strike slip	3	18	4.0	7.2
2	Opak	Strike slip	3	18	2.4	6.8
3	Lembang	Strike slip	3	18	1.5	6.6
4	Lasem	Strike slip	3	18	0.5	6.5
5	Pati	Strike slip	3	18	0.5	6.8

Model sumber gempa background (gridded seismicity)

Salah satu upaya mengakomodir sumber-sumber gempa yang belum teridentifikasi dengan baik tetapi terdapat data gempa historik, maka model sumber gempa ini dikelompokkan kedalam sumber gempa *background*. Pemodelan yang digunakan untuk sumber gempa *background* ini adalah model *gridded* yang berdasar pada laju gempa (*earthquake rates*) secara *spatially smoothed* (Frankel 1995). Untuk analisis spesifik situs dalam makalah ini, sumber gempa *background* disekitar Pulau Jawa dimodelkan berdasarkan kedalamannya yaitu: *shallow background* untuk kedalaman < 50 Km (Gambar 6) dan *deep background* untuk kedalaman 50 - 300 Km (Gambar 7).

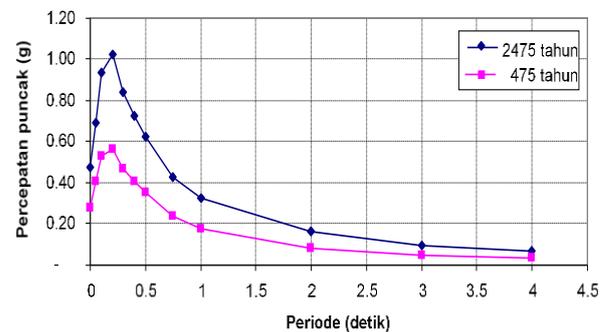
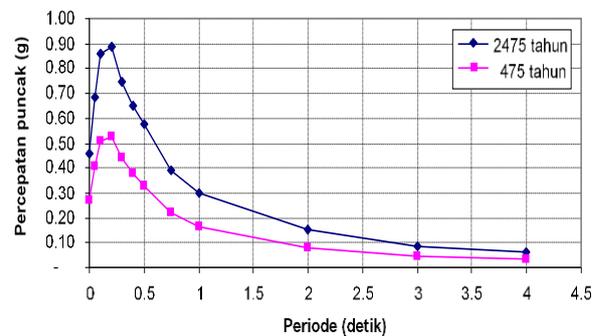
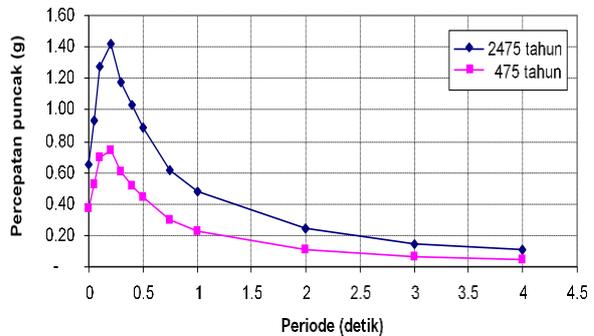
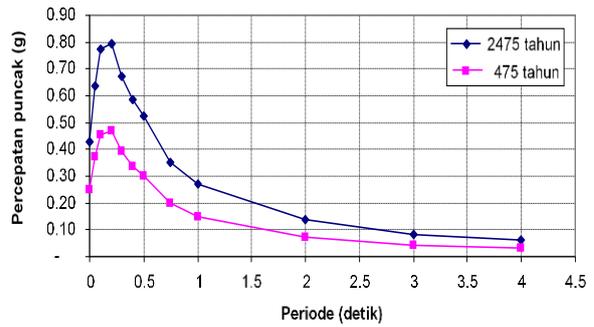


Gambar 7 Distribusi Episentrum Gempa Utama (*main shock*) untuk Sumber Gempa *Deep Background* dengan Kedalaman antara 50-300 Km

Analisis Hazard Gempa di Batuan Dasar

Analisis *hazard* gempa di batuan dasar untuk seluruh lokasi kajian yaitu: Serang, Sukabumi, Cilacap dan Wonogiri dilakukan dengan metode probabilistik seperti dijelaskan pada poin 4 dengan menggunakan persamaan (1). Perhitungan nilai *hazard* dilakukan dengan mempertimbangkan seluruh sumber-sumber gempa yang dianggap masih berpengaruh terhadap lokasi kajian yaitu dengan asumsi radius 500 km, dimana hal ini ditujukan untuk menghasilkan kurva *spektrum respons* pada tiap lokasi kajian.

Berdasarkan hasil analisis *hazard* gempa di batuan dasar pada seluruh lokasi kajian untuk beberapa periode gempa dan dengan menggunakan periode ulang 475 dan 2475 tahun, hasilnya seperti diperlihatkan pada Gambar 8 berupa kurva respons spektra di batuan dasar, dimana terlihat kurva warna biru untuk periode ulang 2475 memiliki percepatan puncak yang lebih tinggi dibanding kurva warna merah untuk periode ulang 475.



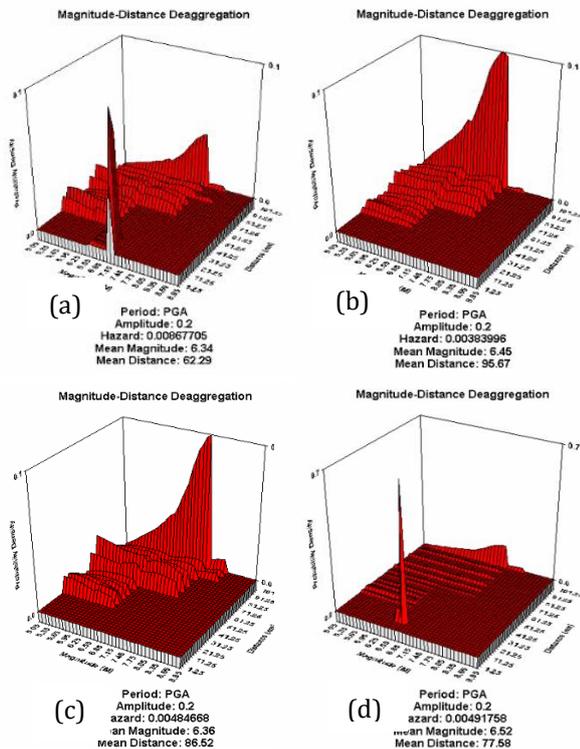
Gambar 8 Kurva Respon Spektra di Batuan Dasar untuk Lokasi (a) Serang, (b) Sukabumi, (c) Cilacap, dan (d) Wonogiri.

Hasil Deagregasi dan Pemilihan Data Input Motion

Hasil analisis *deagregasi* pada seluruh lokasi kajian memperlihatkan kontribusi jarak dan magnitudo yang berpengaruh pada setiap lokasi (Gambar 9) diperoleh pada lokasi Sukabumi dipengaruhi oleh sesar Cimandiri dengan jarak rata-rata 62,29 Km dan Magnitudo 6,34, sedangkan untuk lokasi Serang R = 96,67 Km dan M = 6.45, Cilacap R = 86,52 Km dan

M = 6,36, dan Wonogiri R = 77,58 Km dan M = 6,52 yang dipengaruhi oleh sumber gempa *shallow background*.

<http://peer.berkeley.edu> yang diperoleh beberapa data pencatatan guncangan gempa yang memiliki kesamaan jarak dan magnitudo seperti diperlihatkan pada Tabel 3.



Gambar 9 Hasil Deagregasi untuk Lokasi (a) Serang, (b) Sukabumi, (c) Cilacap, dan (d) Wonogiri.

Berdasarkan hasil analisis deagregasi tersebut, maka dilakukan pencarian data goyangan gempa *shallow crustal* atau sesar di beberapa lokasi kajian yang digeneralisir pada jarak rata-rata 62,29 - 96,67 Km dan Magnitudo 6,34 - 6,52 pada situs

Tabel 3 Pencarian Data *Motion* Sesar Berdasarkan Hasil Deagregasi (<http://peer.berkeley.edu>)

No	Sumber Data Goyangan Gempa	Jarak (km)	Magnitudo
1	Aqaba 1995/11/22 06:16	93.8	7.1
2	Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20	67.9	7.6
3	Friuli, Italy 1976/05/06 20:00	73.3	6.5
4	Georgia, USSR 1991/06/15 00:59	73.3	6.2
5	Irpinia, Italy 1980/11/23 19:34	78	6.5
6	Kobe 1995/01/16 20:46	94.2	6.9
7	Kocaeli, Turkey 1999/08/17	78.9	7.4

9.

Hasil Pemboran Dangkal

Pemboran tanah dangkal dilakukan sampai kedalaman 30 m, diikuti uji *Standard Penetration Test* (SPT) pada seluruh lokasi kajian, dan pengambilan sampel tidak terganggu. Berdasarkan hasil interpretasi data tanah di lapangan diperoleh perlapisan tanah, nilai NSPT dan konversi nilai NSPT ke (V_s) dengan menggunakan persamaan empiris dari Ohta dan Goto (1978) dan Imai dan Tonouchi (1982) yang diperlihatkan pada Tabel 4.

Klasifikasi situs ditentukan berdasarkan nilai rata-rata NSPT atau V_s masing-masing lapisan tanah untuk seluruh ketebalan lapisan tanah sampai kedalaman 30 m (SNI 03-1726-2012) dan diperoleh untuk seluruh lokasi diklasifikasikan kedalam jenis tanah sedang (SD).

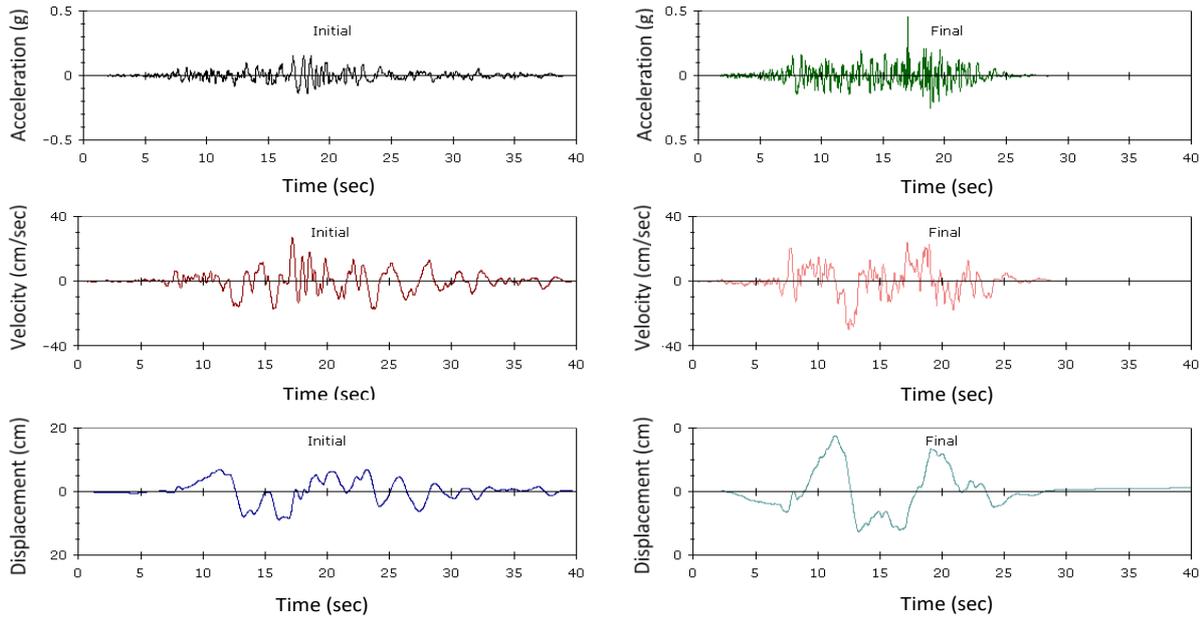
Tabel 4 Perlapisan Tanah dan Korelasi Kecepatan Gelombang Geser di Lokasi Penelitian

Lokasi	Kedalaman (m)	Deskripsi tanah	NSPT	Vs dari korelasi N-SPT (m/s)		Design Vs (m/s)	Kelas situs
				Ohta dan Goto (1978)	Imai dan Tonouchi (1982)		
Serang	0,00 - 2,00	Lempung lanauan	11	193,23	205,74	199,48	SD
	2,00 - 9,55	Lanau pasiran	43	307,58	315,67	311,63	
	9,55 - 12,00	Pasir	47	317,05	324,61	320,83	
	12,00 - 30,00	Breksi tufaan pasiran	60	344,59	350,48	347,53	
	30,00 - 200,00	Bedrock	-	-	-	760,00	
Sukabumi	0,00 - 4,00	Lanau pasir lempungan	10	187,05	199,68	193,36	SD
	4,00 - 9,55	Lempung lanau pasiran	16	219,56	231,43	225,49	
	9,55 - 30,00	Batulanau	55	334,51	341,03	337,77	
	30,00 - 200,00	Bedrock	-	-	-	760,00	
Cilacap	0,00 - 1,00	Pasir lanauan	-	-	-	-	SD
	1,00 - 21,50	Lempung lanau pasiran	33	279,58	289,10	284,34	
	21,50 - 30,00	Lempung lanauan	24	252,83	263,54	258,18	
	30,00 - 200,00	Bedrock	-	-	-	760,00	
Wonogiri	0,00 - 2,00	Lempung lanauan	11	193,23	205,74	199,48	SD
	2,00 - 7,00	Lanau lempungan	10	183,80	196,48	190,14	
	7,00 - 13,50	Lanau kerikilan	44	309,20	317,20	313,20	
	13,50 - 30,00	Breksi abu-abu	60	344,59	350,48	347,53	
	30,00 - 200,00	Bedrock	-	-	-	760,00	

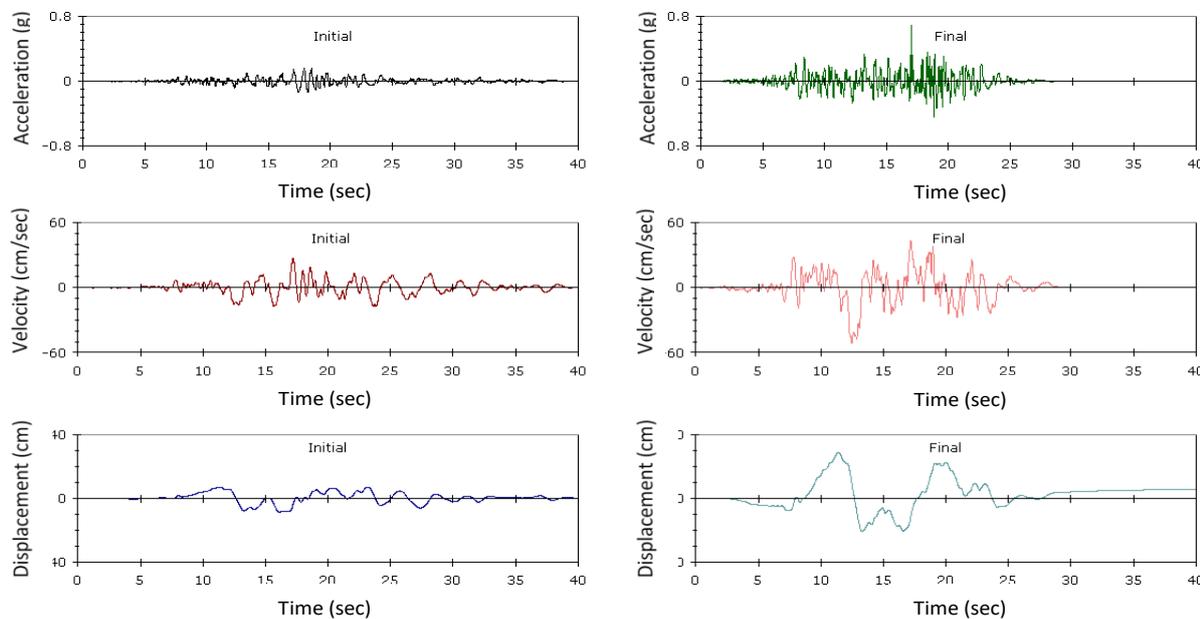
Analisis Perambatan Gelombang

Perhitungan respons spesifik situs dilakukan dengan metode analisis perambatan gelombang 1D ke permukaan tanah dengan bantuan perangkat lunak EZFRISK (Risk Engineering 2007) yang terdiri dari beberapa tahapan yaitu: tahap penskalaan dan pembuatan data digitasi sintetik goyangan gempa (*motion*) di batuan dasar dan input model stratifikasi dan parameter-parameter tanah sampai kedalaman 30 m. Untuk mendapatkan data goyangan gempa yang sesuai dengan lokasi kajian, maka pembuatan

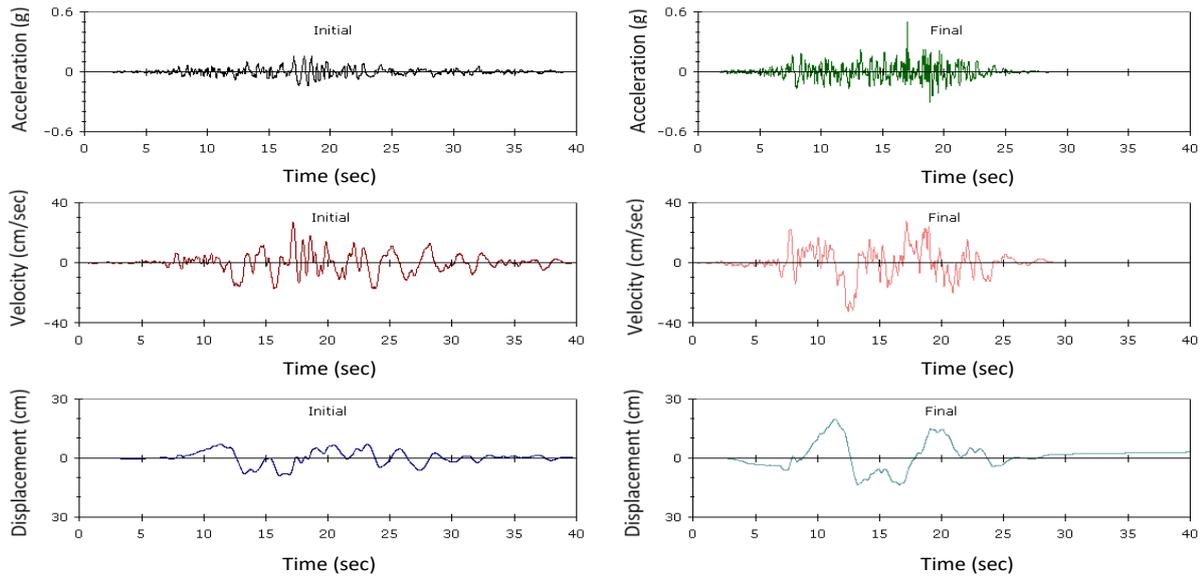
data digitasi sintetik goyangan gempa di batuan dasar dilakukan dengan proses *matching* antara data goyangan gempa yang paling mendekati atau paling sesuai dengan lokasi kajian berdasarkan hasil analisis deagregasi yaitu gempa Irpina (Tabel 3) terhadap respon spektra hasil analisis {Gambar 8 (a) - (d)} sehingga didapatkan data goyangan gempa sintetik (*time series*) di batuan dasar seperti diperlihatkan pada Gambar 10 - 13 untuk periode ulang gempa 2475 tahun, dimana sebelah kiri adalah data *time series* yang belum diskalakan sedangkan gambar kanan adalah sudah mengalami penskalaan.



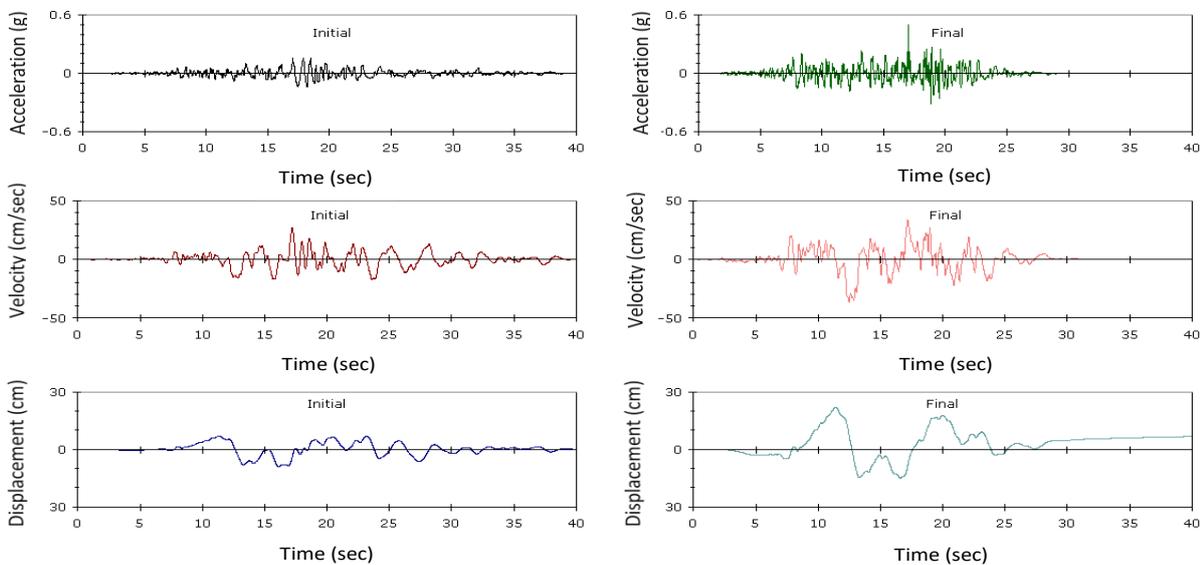
Gambar 10 Data Goyangan Gempa Sintetik di Batuan Dasar untuk Periode Ulang 2475 Tahun di Lokasi Serang.



Gambar 11 Data Goyangan Gempa Sintetik di Batuan Dasar untuk Periode Ulang 2475 Tahun di Lokasi Sukabumi.



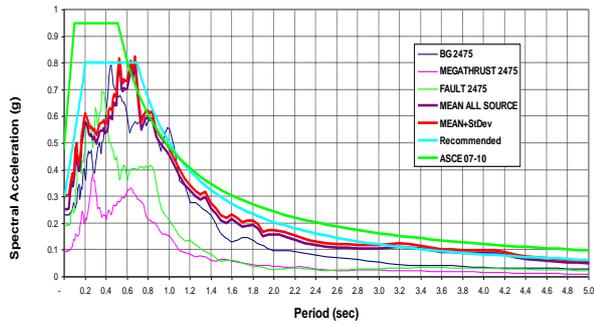
Gambar 12 Data Goyangan Gempa Sintetik di Batuan Dasar untuk Periode Ulang 2475 Tahun di Lokasi Cilacap.



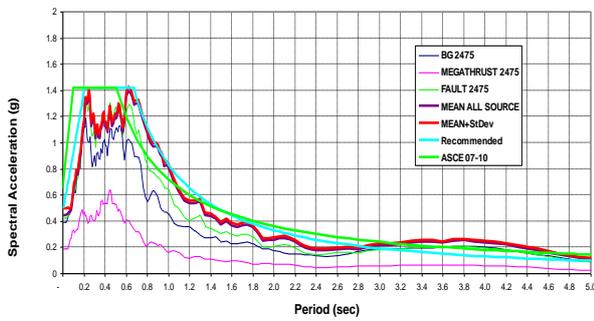
Gambar 13 Data Goyangan Gempa Sintetik di Batuan Dasar untuk Periode Ulang 2475 Tahun di Lokasi Wonogiri.

Dengan menggunakan input data dan parameter hasil pengujian tanah pada Tabel 4, dan input goyangan pada batuan dasar (Gambar 10 - 13), selanjutnya analisis perambatan gelombang 1D dilakukan pada setiap lokasi kajian. Dikarenakan tidak diketahuinya kedalaman *bedrock*, maka diasumsikan *bedrock* dengan nilai kecepatan gelombang geser ≥ 760 (m/detik) berada pada kedalaman 200 m.

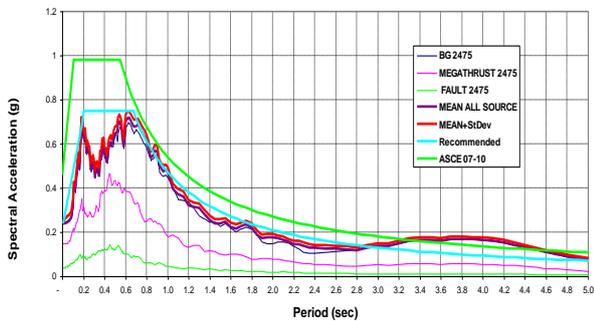
Hasil analisis perambatan gelombang dengan menggunakan software EZFRISK diperlihatkan pada Gambar 10 (a) - (d) yang berupa kurva percepatan puncak dan respon spektra dipermukaan tanah untuk periode ulang 2475 tahun untuk masing-masing model sumber gempa dan perata-rataannya. Kurva spektra desain (garis biru muda) ditentukan berdasarkan hasil spektra gabungan dari seluruh sumber gempa (garis merah). Sedangkan garis hijau adalah spektra desain dari ASCE07-10 untuk jenis tanah sesuai lokasinya.



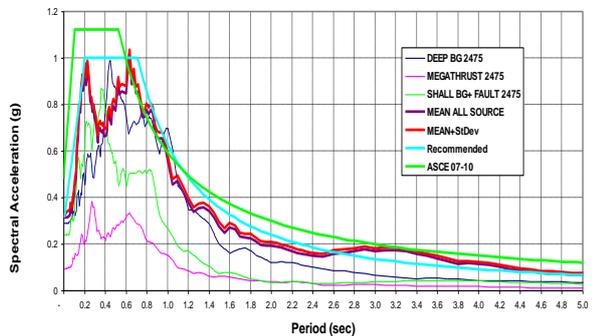
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 10 Respon Spektra Desain di Permukaan untuk Periode Ulang 2475 Tahun dan Perbandingan dengan ASCE 07-10 untuk Lokasi (a) Serang, (b) Sukabumi, (c) Cilacap, dan (d) Wonogiri

Berdasarkan hasil analisis *hazard* gempa di batuan dasar dengan menggunakan perangkat lunak EZFRISK menunjukkan kesesuaian yang cukup baik bila dibandingkan dengan nilai *hazard* yang tercantum pada Peta Gempa Indonesia 2010 hasil studi Irsyam dkk. (2010) menggunakan perangkat lunak USGS-2010 (Harmsen S 2007). Nilai *hazard* hasil perhitungan pada penelitian ini sebagian besar sangat mendekati atau berada pada rentang nilai tersebut seperti yang diperlihatkan hasil perbandingannya pada Tabel 5.

Berdasarkan hasil analisis respons spesifik situs pada setiap lokasi kajian diperoleh nilai percepatan dipermukaan untuk periode ulang 2475 tahun yang sangat beragam seperti terlihat pada Tabel 6. Hal ini memperlihatkan perbedaan yang cukup signifikan antara percepatan di batuan dasar dan permukaan. Pada respons spektra 1,0 detik terlihat ada perbesaran akibat faktor amplifikasi, sedangkan pada PGA dan respons spektra 0,2 detik terjadi deamplifikasi. Berdasarkan hasil tersebut terlihat bahwa fenomena amplifikasi dan deamplifikasi selain dipengaruhi oleh kondisi tanah, dipengaruhi juga oleh nilai percepatan dan frekuensi gelombang gempa dimana amplifikasi sering terjadi pada percepatan rendah dan frekuensi tinggi.

Tabel 7 memperlihatkan besaran amplifikasi pada setiap lokasi kajian untuk PGA, 0,2 dan 1,0 detik untuk jenis tanah sedang yang besarnya sangat beragam. Apabila dibandingkan dengan ASCE-07-10 untuk jenis tanah yang sama terlihat nilai amplifikasi hasil penelitian yang lebih rendah terutama untuk PGA yang mengalami deamplifikasi, sedangkan untuk perioda 0,2 dan 1,0 detik relatif tidak jauh berbeda. Hal ini memperlihatkan bahwa asumsi kedalaman batuan dasar dan profil tanah diatas batuan dasar yang kurang tepat sangat sensitif terhadap hasil perhitungan amplifikasi pada PGA.

Tabel 5 Perbandingan Percepatan Puncak Dibatuan Dasar dengan Peta Gempa Indonesia 2010 untuk Periode Ulang 2475 Tahun

Lokasi	Penelitian			Peta Gempa 2010		
	Percepatan (g)					
	PGA	0,2	1,0	PGA	0,2	1,0
Sukabumi	0,65	1,42	0,48	0,60-0,70	1,20-1,50	0,50-0,6
Serang	0,43	0,79	0,27	0,40-0,50	0,70-0,80	0,25-0,30
Cilacap	0,46	0,89	0,30	0,40-0,50	0,80-0,90	0,30-0,40
Wonogiri	0,48	1,02	0,33	0,40-0,50	0,90-1,00	0,30-0,40

Tabel 6 Perbandingan Nilai Percepatan Puncak di Batuan Dasar dan di Permukaan untuk Periode Ulang 2475 Tahun

Lokasi	Dibatuan Dasar			Dipermukaan		
	Percepatan (g)					
	PGA	0,2	1,0	PGA	0,2	1,0
Sukabumi	0,65	1,42	0,48	0,49	1,42	0,83
Serang	0,43	0,79	0,27	0,30	0,80	0,50
Cilacap	0,46	0,89	0,30	0,24	0,75	0,47
Wonogiri	0,48	1,02	0,33	0,31	1,00	0,63

Tabel 7 Perbandingan Faktor Amplifikasi Hasil Penelitian dan ASCE-07-10 pada Tanah Sedang untuk Periode Ulang 2475 Tahun

Lokasi	Hasil Penelitian			ASCE-07-10 (tanah sedang)		
	Faktor Amplifikasi					
	PGA	0,2	1,0	PGA	0,2	1,0
Sukabumi	0,76	1,00	1,74	1,0 - 1,1	1,0 - 1,2	1,6 - 2,0
Serang	0,70	1,01	1,86			
Cilacap	0,52	0,84	1,57			
Wonogiri	0,65	0,98	1,90			

KESIMPULAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis *hazard* gempa dibatuan dasar dan analisis perambatan gelombang ke permukaan tanah pada 4 (empat) lokasi kajian yaitu di Serang, Sukabumi, Cilacap, dan Wonogiri untuk periode ulang 2475 tahun dapat disimpulkan sebagai berikut :

Nilai *hazard* gempa dibatuan dasar pada tiap lokasi dengan menggunakan perangkat lunak EZFRISK secara umum menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan peta gempa Indonesia 2010 yang diproses dengan menggunakan perangkat lunak PSHA-USGS 2010 dimana nilai yang diperoleh dari hasil perhitungan berada pada rentang percepatan tersebut, kecuali untuk untuk respons spektra 1,0 detik di lokasi Sukabumi dimana diperoleh nilai yang lebih rendah dari peta gempa.

Nilai percepatan gempa dipermukaan pada setiap lokasi kajian diperoleh hasil yang sangat beragam dimana pada respons spektra 1,0 detik terlihat mengalami perbesaran dibandingkan dengan di batuan dasar sebagai akibat dari fenomena amplifikasi, sedangkan pada PGA dan respons

spektra 0,2 detik (kecuali untuk lokasi Serang) mengalami penurunan dibandingkan dibatuan dasar yang disebut deamplifikasi. Hal ini tentunya menunjukkan bahwa banyak faktor yang sangat mempengaruhi besaran amplifikasi antara lain: percepatan dan periode/frekuensi gempa, serta faktor jenis dan ketebalan lapisan tanah. Pada jenis tanah yang sama, amplifikasi yang besar terjadi pada percepatan rendah dan frekuensi tinggi.

Hasil perhitungan faktor amplifikasi lapisan tanah pada setiap lokasi kajian bila dibandingkan dengan nilai amplifikasi yang dimuat pada ASCE-07-10 untuk kondisi tanah yang sama yaitu untuk PGA diperoleh 0,52 – 0,76 (ASCE-07-10 adalah 1,0 – 1,1), untuk respons spektra 0,2 detik diperoleh 0,84 – 1,01 (ASCE-07-10 adalah 1,0 – 1,2), dan pada respons spektra 1,0 detik diperoleh 1,57 – 1,90 (ASCE-07-10 adalah 1,6 – 2,0) memperlihatkan bahwa nilai amplifikasi hasil studi ini lebih kecil dari ASCE-07-10, hal ini sangat wajar dikarenakan untuk 30 m teratas yang diperhitungkan pada ASCE-07-10 merupakan amplifikasi terbesar yang terjadi dekat permukaan. Sedangkan terjadinya perbedaan faktor amplifikasi yang cukup jauh pada PGA dimana terjadi deamplifikasi kemungkinan disebabkan asumsi

kedalaman batuan dasar dan profil tanah diatas batuan dasar yang kurang tepat sangat sensitif terhadap hasil perhitungan amplifikasi pada PGA.

Saran

Dikarenakan belum diketahuinya kedalaman *bedrock* sesungguhnya pada 4 lokasi tersebut, maka perlu dilakukan pengukuran nilai kecepatan gelombang geser menggunakan *microtremor array* untuk mendapatkan estimasi kedalaman *bedrock* dan dapat dilakukan analisis lanjutan untuk mengetahui pengaruh kedalaman *bedrock* terhadap amplifikasi di permukaan tanah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Badan Litbang, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat yang telah memberi kesempatan kami untuk melakukan studi dan pengumpulan data. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para penelaah dan tim redaksi atas masukan konstruktif untuk penyempurnaan karya tulis ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abrahamson, N. A. 1998. "Non-Stationary Spectral Matching Program RSPMATCH". PG & E Internal Report, February.
- Aki, K. 1965. "Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log(N)=a - bM$ and its confidence limits". *Bulletin of the Earthquake Research Institute*. Tokyo University. (43): 237-239.
- Aldiamar, Fahmi. 2007. Analisis Resiko Gempa dan Pembuatan Respons Spektra Desain untuk Jembatan Suramadu. *Tesis S-2 Program Studi Rekayasa Geoteknik*. Institut Teknologi Bandung.
- American Society of Civil Engineers (ASCE). 2010. "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures". ASCE (7): 109-117.
- Asrurifak M., Irsyam M., Budiono B., Triyoso W., Hendriyawan. 2010. "Development of Spectral Hazard Map for Indonesia with a Return Period of 2500 Years using Probabilistic Method". *J. Civil Eng. Dim.* 12 (1): 52-62.
- Atkinson, G., Boore, D. 1995. "New Ground Motion Relations for Eastern North America". *Bulletin of the Seismological Society of America*. 85: 17- 30.
- Atkinson, G.M. Boore D. M. 2003. 'Empirical ground motion relations for subduction zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions". *Bulletin of the Seismological Society of America*. 93 (4): 1703-1729.
- Badan Standardisasi Nasional. 2012. "Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Non Gedung" SNI 1726 2012.
- Bock, Y., Prawirodirdjo, L., Genrich, J.F., Stevens, C.W., McCaffrey, R., Subarya, C., Puntodewo, S.S.O., dan Calais, E. 2003. "Crustal Motion in Indonesia from Global Positioning System Measurement". *Journal of Geophysics Research* 108 (B8): 67-88.
- Boore, D.M. dan Atkinson, G.M. 2008. "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* 24 (1).
- Campbell, K.W. dan Bozorgnia, Y. 2008. "Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5%-Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10.0 s". *Earthquake Spectra* 24(1).
- Chiou, B. dan Youngs, R., 2008. "NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra". *Earthquake Spectra* 24 (1).
- Engdahl, E. R., A. Villasenor, H. R. DeShon, dan C. H. Thurber. 2007. "Teleseismic relocation and assessment of seismicity (1918-2005) in the region of the 2004 Mw 9.0 Sumatra-Andaman and 2005 Mw 8.6 Nias Island great earthquakes". *Bulletin of the Seismological Society of America* 97: 43-61.
- Frankel, A. 1995. "Mapping seismic hazard in the Central and Eastern United States" *Seis. Res. Letters* 66: 8-21.
- Gardner, J.K. dan 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.
- Gutenberg, B. dan Richter, C. 1944. "Frequency of earthquakes in California". *Bulletin of the Seismological Society of America* 34: 185-188.
- Harmsen, S. 2007. "USGS Software for Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)". Draft Document, (unpublished).
- Imai, T., dan Tonouchi, K. 1982. "Correlation of N-Value with S-Wave Velocity and Shear Modulus" *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing* : 67-72.
- Irsyam M., Dangkoa T. D., Kusumastuti D., Kertapati, E. 2007. "Methodology of site specific seismic hazard analysis for important civil structure". *Journal Civil Engineering Dimension* 9 (2): 103-112.

- Irsyam M., Sengara, I.W., Widiyantoro, S., Natawijaya, D.H., Triyoso, W., Meilano, I., Kertapati, E., Aldiamar, F., Suhardjono, Asrurifak, M, Ridwan, M. 2010. "Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia". Laporan Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010. Puslitbang Perbukitan.
- Krammer, S.L. 1996. "Geotechnical Earthquake Engineering". New Jersey : Prentice Hall.
- McGuire, R.K. 1976. "Fortran Computer Program For Seismic Risk Analysis". U.S. Geological Survey Open-File Report: 76-67.
- Ohta Y dan Goto N. 1978. "Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristics soil indexes". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 6: 167-187.
- Risk Engineering. 2007. "Software for Eartquake groundmotion estimation, user manual, background and theories, attenuation function", US Geological Survey.
- Youngs, R.R., Chiou, S.-J., Silva, W.J., Humphrey, J.R. 1997. "Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes". *Seis. Res. Let.* 68 (1): 58-73.
- Zhao, X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H., Somerville, P. 2006. "Attenuation Relations of Strong Motion in Japan using Site Classification Based on Predominant Period". *Bulletin of the Seismological Society of America* 96: 898-913.
- <http://peer.berkeley.edu>