ISSN 0853-2982

JURNAL TEKNIK SIPIL
Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

Analisis *Hazard* Gempa dan Usulan *Ground Motion* pada Batuan Dasar untuk Kota Jakarta

Bigman Marihat Hutapea
Kelompok Keahlian Geoteknik, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha No.10 Bandung 40132, E-mail: bigmanhtp@gmail.com

Imanuel Mangape
Program Magister Geoteknik, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha No.10 Bandung 40132, E-mail: nuel_mangape@yahoo.co.id

Abstrak

Analisis hazard gempa untuk kota Jakarta dilakukan dengan menggunakan teori probabilitas total. Program USGS-PSHA-07 digunakan untuk melakukan analisis hazard gempa dengan pemodelan sumber gempa 3-dimensi, untuk periode ulang 475 tahun. Hasil analisis menunjukkan bahwa percepatan maksimum batuan dasar (PBA) di kota Jakarta (0.239 g) lebih besar dibanding PBA untuk kota Jakarta menurut SNI 03-1726-2002 (0.15 g). Pembuatan ground motion sintetik dilakukan dengan bantuan Program SYNTH, dengan menggunakan hasil deagregasi dari penelitian sebelumnya.

Kata-kata Kunci: *Teori probabilitas total, USGS-PSHA-07, PGA, ground motion sintetik, SYNTH.*

Abstract

Seismic hazard analysis for Jakarta was conducted using total probability theorem. The USGS-PSHA-07 software was used to run the seismic hazard analysis which adapted a 3-dimension seismic source model for return periods of 475 years. The results show that peak base rock acceleration (PBA) in Jakarta obtained in this study (0.239 g) is larger than that given in the Indonesian Seismic Code SNI 03-1726-2002 (0.15 g). SYNTH software was used to develop synthetic ground motion by using deaggregation from previous study.

Keywords: *Total probability theorem, USGS-PSHA-07, PGA, synthetic ground motion, SYNTH.*

1. Pendahuluan

Analisis *hazard* gempa bertujuan untuk menentukan suatu batas intensitas gempa tertentu yang berlaku di daerah kajian berdasarkan suatu nilai kemungkinan yang akan terjadi atau terlampaui pada suatu periode tertentu. Metoda yang dipergunakan untuk menentukan batas tersebut adalah Metode Probabilistik-*Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA), sementara bahasan mengenai *ground motion* sintetik bertujuan untuk mendapatkan beban gempa sintetik untuk keperluan disain bangunan tahan gempa.

Percepatan maksimum di batuan dasar (PGA) menurut SNI 03-1726-2002 untuk kota Jakarta adalah 0.15 g, untuk periode ulang 475 tahun. Untuk meninjau ulang peraturan tersebut, maka dalam studi ini dilakukan analisis risiko gempa untuk kota Jakarta dengan model sumber gempa 3D dengan bantuan Program PSHA dari USGS (2007). Diharapkan akan diperoleh hasil yang lebih akurat dengan pemodelan sumber 3D dan penggunaan fungsi atenuasi generasi baru (NGA).

Beberapa penelitian terdahulu memperlihatkan nilai PGA untuk kota Jakarta lebih besar dari nilai yang disyaratkan SNI 03-1726-2002, untuk periode ulang yang sama (475 tahun). Petersen dkk (2007) telah melakukan penelitian mengenai analisis probabilistik risiko gempa untuk wilayah Asia Tenggara. Dari penelitian tersebut diperoleh nilai PGA untuk kota Jakarta sebesar 0.25 g. Usulan peta gempa oleh Irsyam dkk (2008) menempatkan kota Jakarta dalam zona PGA antara 0.20 g – 0.25 g. Penelitian mengenai seismo-tektonik dan PSHA untuk wilayah Jakarta oleh Rudianto (2008) menghasilkan nilai PGA sebesar 0.23 g. Demikian pula dalam Peta Gempa Indonesia yang dipulikasikan oleh USGS (2009), kota Jakarta berada pada zona PGA antara 0.245 g – 0.326 g.

2. Data Gempa

Data pencatatan gempa yang digunakan merupakan gabungan dari beberapa katalog gempa, yaitu ISC (*International Seismological Centre*), EHB (Engdahl, van der Hilst, dan Burland), NEIC-USGS, NOAA dan ANSS (*Advanced National seismic System*). Rentang pengamatan pencatatan dimulai dari tahun 1900 hingga Januari 2009. Gabungan katalog-katalog ini meliputi wilayah dalam radius 500 km dari Jakarta (106.83 BT; -6.15 LS).

2.1 Pemisahan gempa utama dan gempa susulan

Dari data yang terkumpul kemudian dilakukan pemisahan gempa utama dan gempa susulan. Analisis resiko gempa probabilistik dilakukan berdasarkan kejadian gempa independen atau gempa utama. Kejadian-kejadian gempa dependen atau gempa susulan, seperti *beforeshock* dan *aftershock* yang terjadi dalam suatu rangkaian kejadian gempa harus diidentifikasi sebelum dilakukan analisis. Memasukkan kejadian gempa dependen dalam analisis akan mengakibatkan sedikit peningkatan pada hasil analisis resiko gempa (Pacheco and Sykes, 1992). Dalam studi ini, kriteria yang digunakan adalah kriteria dari Gardner dan Knopoff (1974) untuk mengeliminasi *beforeshock* dan *aftershock* dari katalog gempa. Ploting data katalog untuk beberapa variasi kedalaman dan magnitude dapat dilihat pada **Gambar 1**.

2.2 Analisis kelengkapan data gempa

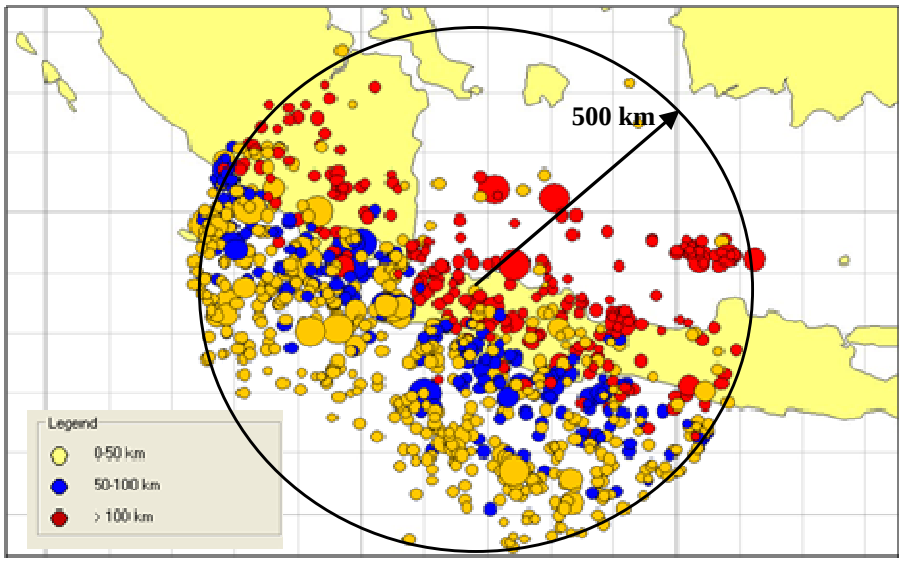
Estimasi resiko gempa memerlukan suatu kurun waktu dimana kejadian gempa independen dalam rentang magnitude tertentu dapat dikatakan lengkap dalam suatu katalog gempa. Data pencatatan kejadian gempa historis untuk kejadian-kejadian gempa besar lebih lengkap dibanding kejadian-kejadian gempa kecil. Hal ini disebabkan pada masa awal pengamatan jumlah alat pencatat gempa tidak terlalu banyak sehingga alat-alat tersebut hanya mencatat kejadian-kejadian gempa besar. Jika data yang tidak lengkap digunakan dalam analisis resiko gempa, maka hasil yang didapat akan terlalu kecil (*underestimated*) untuk gempa-gempa kecil dan terlalu besar (*overestimated*) untuk kejadian gempa besar.

Untuk mengetahui periode dimana suatu katalog gempa yang digunakan cukup lengkap, frekuensi kejadian gempa independen untuk beberapa rentang magnitude diplotkan terhadap waktu yang dihitung dari waktu pengamatan terakhir kebelakang. Frekuensi kejadian gempa (l) didefinisikan sebagai jumlah kejadian gempa (N) selama selang waktu tertentu (T) dibagi dengan T. Dengan asumsi bahwa *seismic rate* konstan untuk rentang periode yang lama, waktu dimana frekuensi kejadian gempa mulai menurun secara signifikan menyatakan suatu batas waktu dimana katalog gempa sebelumnya tidak lengkap.

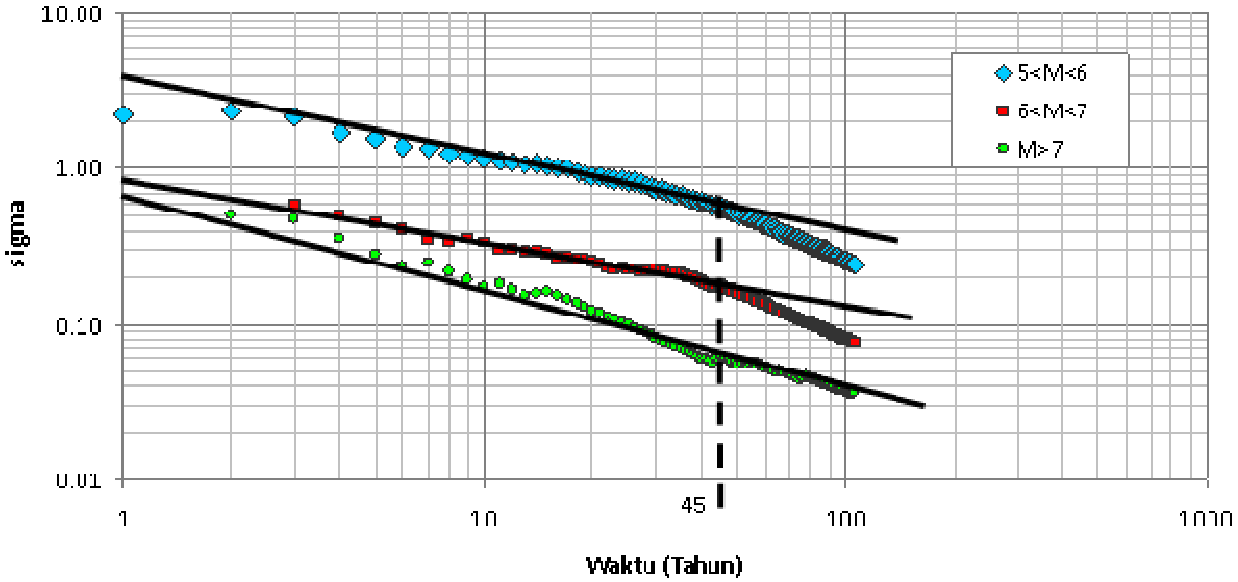
$$l = (S\ N) / T \qquad (1)$$

Sedangkan varian untuk setiap interval dihitung dengan persamaan berikut:

$$s = \sqrt{\lambda} / T \qquad (2)$$



Gambar 1. Data gempa utama di sekitar Jakarta (radius 500 km) hingga Januari 2009



Gambar 2. Hasil analisa kelengkapan data

Dari hasil analisa kelengkapan data gempa yang diplot pada grafik di **Gambar 2** diperoleh bahwa untuk data gempa dengan magnitude 5 sampai 6 lengkap hingga 45 tahun terakhir. Untuk Magnitude 6 sampai 7, data gempa lengkap sampai 45 tahun terakhir. Sedangkan untuk gempa di atas magnitude 7, data gempa lengkap hingga 106 tahun terakhir. Data epicenter tersebut kemudian dikelompokkan/disebar ke dalam sumber gempa masing-masing, yang dianalisis independen kemudian digabungkan dalam *uniform hazard*.

3. Identifikasi dan Pemodelan Sumber Gempa

Sumber-sumber gempa dalam program Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) dari USGS diklasifikasikan dalam tiga jenis zona sumber gempa, yaitu:

1. Zona subduksi, yaitu zona kejadian gempa yang terjadi didekat batas pertemuan antara lempeng samudera yang menunjam 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. Dalam penelitian ini, zona subduksi yang dimaksud adalah zona *megathrust*, yakni sumber gempa subduksi dari permukaan hingga kedalaman 50 km. Untuk sumber subduksi dengan kedalaman lebih dari 50 km (zona *benioff*) akan dimodelkan sebagai sumber *deep background*.
2. Zona *fault*, yaitu zona kejadian gempa patahan dangkal (*Shallow Crustal Fault*) dengan mekanisme *strike-slip, reverse, atau normal* yang terjadi pada patahan-patahan yang sudah terdefinisi dengan jelas, termasuk soal mekanisme, *slip rate, dip*, panjang patahan dan lokasinya. Sumber gempa patahan dangkal dimodelkan hingga kedalaman 15 km.
3. Zona *background*, yaitu sumber gempa yang belum diketahui secara jelas, tetapi pada tempat tersebut didapati adanya beberapa kejadian gempa (kejadian gempa yang belum diketahui sesarnya). Dalam program PSHA dari USGS, jika lokasi/posisi strike sumber background diyakini/diketahui keberadaannya maka sumber dapat dimodelkan sebagai *Fixed-strike.* Sebaliknya jika sumber tersebut tidak diketahui dengan jelas, maka sumber *background* dimodelkan sebagai sumber titik untuk magnitude kurang dari 6, dan sebagai *random strike* untuk gempa dengan magnitude lebih dari atau sama dengan 6. Panjang sumber gempa ditentukan dari besarnya magnitude (Wells and Coppersmith, 1994).

Sumber gempa *background* dibagi menjadi dua berdasarkan kedalaman, yakni *shallow background* dengan kedalaman hingga 50 km dan *deep background* dengan kedalaman lebih dari 50 km (*benioff*). Dalam studi ini, kedalaman *deep background* diambil hingga 300 km.

Sumber gempa *benioff* merupakan bagian dari zona subduksi yang diyakini sebagai akibat dari tekanan lentur yang diterima oleh lempeng yang menunjam (Petersen et al, 2004).

Daerah pengaruh yang diambil untuk sumber gempa subduksi adalah radius 500 km dari wilayah kota Jakarta, dengan asumsi bahwa kejadian-kejadian gempa yang terjadi di luar jarak tersebut tidak memberikan kontribusi yang berarti lagi. Sedangkan untuk sumber gempa patahan (*Shallow Crustal Fault*) daerah pengaruhnya adalah radius 200 km dari kota Jakarta.

Sumber gempa yang diperhitungkan dalam studi ini antara lain *Megathtrust* Sumatera, *Megathrust* Jawa, *Benioff* Sumatera, *Benioff Jawa*, *Shallow Background* Pelat Sunda, Sesar Sumatera, Sesar Cimandiri, Sesar Lembang, Sesar Baribis dan Sesar Bumiayu.

3.1 *Megathrust* Sumatera

Zona subduksi Sumatera merupakan sumber gempa yang sangat aktif, dengan jumlah kejadian gempa independen dengan magnitude lebih dari 5 adalah 240 kejadian dalam 40 tahun terakhir. Gempa terbesar tarjadi pada 26 Desember 2004 dengan Magnitude 9,2. Pusat gempa pada 3.316° Lintang Utara dan 95.854° Bujur Timur atau sekitar 150 km sebelah barat pesisir pantai Aceh bagian barat, dengan kedalaman 30 km (USGS Earthquake Center).

Lempeng Indo-Australia bergerak relative terhadap Lempeng Eurasia dengan kecepatan 65 mm/tahun pada arah sekitar N10°E (Sieh et al, 2000). Dari data epicenter gempa terlihat bahwa zona ini termasuk zona dangkal dengan sudut penunjaman bervariasi antara 13° - 15° terhadap horizontal.

3.2 *Megathrust* Jawa

Pada sumber gempa ini, lempeng Australia bergerak kearah utara dengan kecepatan 77 mm/tahun. Lempeng Australia menunjam ke bawah lempeng Sunda pada pertemuan kedua lempeng yang membentuk Palung jawa di selatan Jawa, dan terus menunjam ke bawah sampai berada di bawah Pulau Jawa bahkan sampai ke utara Pulau Jawa (*Zona benioff*).

Zona ini juga merupakan zona gempa dengan tingkat aktifitas yang tinggi. Tercatat beberapa gempa gempa besar yang pernah tarjadi pada zona ini, antara lain: 20 Agustus 1977 terjadi gempa dengan magnitude 8.3 yang menghasilkan tsunami dengan ketinggian 15 m dan mengakibatkan 200 orang meninggal dunia. Terakhir gempa dengan magnitude 7.7 pada 17 Juli 2006 dengan pusat gempa pada 9.222° Lintang Selatan dan 107.320° Bujur Timur atau sekitar 230 km sebelah selatan Tasikmalaya pada kedalaman 34 km, yang juga menghasilkan tsunami. Dalam kejadian ini 403 orang menjadi korban.

3.3 *Benioff* Sumatera

Tercatat 114 kejadian gempa independen dengan M > 5 untuk 40 tahun terakhir. Zona benioff ini diperhitungkan dari kedalaman 50 km – 200 km, dengan sudut penunjaman antara 40° - 45°. Gempa terbesar pada zona ini tercatat pada 28 Desember 1935 pada koordinat 98.3° Bujur Timur dan 0° Lintang dengan magnitude 8.1.

3.4 *Benioff* Jawa

Zona ini juga merupakan zona aktif dengan 234 kejadian gempa independen dalam 40 tahun terakhir. Pencatatan terakhir gempa yang dengan magnitude cukup besar pada 9 Agustus 2007 (M = 7.5) di 5.968° Lintang Selatan dan 107.655° Bujur Timur atau sekitar 100 km sebelah timur Jakarta, pada kedalaman 289 km. Sudut penunjaman untuk zona ini sekitar 50°. Data gempa diambil pada kedalaman 50 km – 500 km.

3.5 Sesar Sumatera

Sumber gempa ini cukup aktif, yang terdiri atas beberapa segmen. Gempa dengan magnitude 7.5 terjadi pada 9 Juni 1943. *Slip rate* sumber gempa Sesar Sumatera berkisar 6-27 mm/tahun, dapat dilihat pada **Tabel 1** (M.D. Petersen et. al, 2004). Nilai *slip rate* yang digunakan dalam studi ini adalah 11 mm/tahun.

Tabel 1. *Slip rate* di sesar Sumatera

Segment	*Slip rate (mm/year)*	*Magnitude*	*Segment*	*Slip rate (mm/year)*	*Magnitude*
Segmentation model 1			*Segmentation model 2*		
1	6	7.1	Sunda	11	7.4
2	6	6.8	Semangko	11	7.3
3	8	7.1	Kumering	11	7.6
4	10	7.3	Manna	11	7.3
5	11	7.1	Musi	11	7.2
6	13	7.4	Ketaun	11	7.3
7	15	7.2	Dikit	11	7.3
8	17	7.3	Siulak	11	7.3
9	17	6.9	Suliti	11	7.4
10	23	7.2	Sumani	11	7.1
11	23	7.1	Sianok	11	7.2
12	23	7.5	Sumpur/Barumun	23	7.7
13	23	7.2	Toru	27	7.4
14	23	6.7	Renun	27	7.7
15	23	7.0	Tripa	27	7.7
16	23	7.5	Aceh (south)	27	7.4
			Seulimeum	27	7.5

Sumber: Petersen et al., 2004.

3.6 Sesar Cimandiri (Sukabumi)

Sesar Cimandiri adalah sesar aktif yang terdapat di Selatan Sukabumi yang terbentuk akibat aktivitas subduksi lempeng Indo-Australia dibawah lempeng Eurasia. Sesar ini berarah Barat Daya-Timur Laut (*strike* N 68° E) dan memanjang dari Pelabuhan Ratu sampai ke Lembang. Sesar ini terletak di daerah yang padat penduduk. Mekanisme sesar Cimandiri berupa *reverse fault* dengan kemiringan sesar sebesar 30^o, *slip rate* 2 mm/tahun (Kertapati, 2006).

3.7 Sesar Lembang

Mekanisme sesar Lembang berupa *normal fault* dengan *slip rate* 2 mm/tahun (Kertapati, 2006). Sesar Lembang merupakan salah satu *landmark* geologis yang paling menarik di dataran tinggi Bandung dengan ekspresi geomorfologi yang jelas dari aktivitas neotektonik di Cekungan Bandung. Keberadaannya yang dekat dengan area pemukiman di sepanjang Lembang hingga Cisarua, mengakibatkan sesar ini berpotensi menyebabkan bencana pada daerah dan sekitar wilayah tersebut.

Sesar Lembang yang letaknya di utara Bandung, membentang sepanjang kurang lebih 30 km dengan arah barat-timur. Sesar ini berjenis *normal fault* (sesar turun) dimana blok bagian utara relatif turun membentuk morfologi pedataran (pedataran Lembang).

3.8 Sesar Baribis

Sesar Baribis yang letaknya di bagian utara Jawa merupakan sesar naik (*reverse fault)* dengan kemiringan sebesar 31^o, *slip rate* 1,5 mm/tahun (Achdan dan Sudana, 1992) dan dengan arah relatif barat-timur, membentang mulai dari Purwakarta hingga ke daerah Baribis di Kadipaten-Majalengka. Bentangan jalur sesar Baribis dipandang berbeda oleh peneliti lainnya. Simandjuntak (1996) menafsirkan jalur sesar naik Baribis menerus ke arah timur hingga menerus ke daerah Kendeng (Jawa Timur). Penulis terakhir ini menamakannya sebagai "Baribis-Kendeng Fault Zone". Secara tektonik, sesar Baribis mewakili umur paling muda di Jawa, yaitu pembentukannya terjadi pada periode Plio-Plistosen. Selanjutnya oleh Martodjojo dan Pulunggono (1994), sesar ini dikelompokan sebagai Pola Jawa.

3.9 Sesar Bumiayu

Dari pencatatan gempa dari tahun 1974 sampai 2009, terdapat delapan gempa yang berasosiasi dengan sumber ini. Sesar ini terletak pada perbatasan Jawa Barat dengan Jawa Tengah. Mekanisme sesar Bumiayu berupa *reverse fault* dengan kemiringan sebesar 90^o, *slip rate* 2 mm/tahun (Kertapati, 2006).

4. Atenuasi

Fungsi atenuasi merupakan suatu fungsi yang menggambarkan hubungan antara intensitas gerakan tanah (I) dan magnitude (M) serta jarak (R) dari suatu sumber titik dalam daerah sumber. Secara umum, fungsi atenuasi tergantung pada faktor-faktor berikut, antara lain:

1. Tipe mekanisme sumber gempa daerah yang ditinjau
2. Jarak episenter
3. Kondisi lapisan kulit bumi yang dilintasi oleh gelombang gempa
4. Kondisi tanah lokal di sekitar lokasi

Fungsi atenuasi merupakan suatu fungsi khas yang diturunkan dari data gempa pada suatu daerah tertentu. Sejumlah peneliti telah mempublikasikan beberapa fungsi atenuasi berdasarkan catatan gempa yang pernah terjadi. Namun, hingga saat ini belum ada fungsi atenuasi yang dihasilkan dari catatan gempa di wilayah Indonesia. Oleh karena itu, untuk analisis *seismic hazard* ini akan digunakan fungsi atenuasi dari daerah lain yang memiliki kemiripan tektonik dan geologi wilayah Indonesia. Dasar pemilihan fungsi atenuasi yang paling penting adalah berdasarkan mekanisme kejadian gempa, dimana secara umum dikategorikan dalam zona gempa subduksi, zona gempa *background* dan zona gempa *shallow crustal*.

Persamaan atenuasi yang digunakan dalam penelitian ini ditentukan berdasarkan mekanisme sumber. Untuk sumber *Megathrust* (0-50 km) digunakan persamaan atenuasi *Geomatrix subduction* (Youngs et al, SRL, 1997), AB03 *rock and global sourc,* dan Zhao et al (BSSA, 2006). Untuk sumber *Benioff* (50-300 km) dipakai persamaan atenuasi Atkinson-Boore *intraslab seismicity, Geomatrix slab seismicity rock* 1997 SRL dan Atkinson-Boore 2003 *intraslab seismicity world data.* Untuk sumber *Shallow Background* (0-50 km) dipakai persamaan atenuasi Boore-Atkinson NGA (versi Februari 2007), Campbell-Bozorgnia NGA (versi 14 November 2006) dan Chiou-Youngs, NGA (versi 6-2006). Sedangkan untuk sumber patahan (0-50 km) digunakan persamaan atenuasi Boore-Atkinson NGA (versi 10-27-2006), Campbell-Bozorgnia NGA (versi 11-2006) dan Chiou-Youngs, NGA (versi 6-2006).

5. Analisis *Hazard* Gempa

Metoda PSHA memberikan ruang kerja yang memungkinkan faktor ketidakpastian dapat diidentifikasi, diukur dan digabungkan pada suatu hubungan yang rasional untuk menghasilkan gembaran yang lebih detail dalam perhitungan analisis *hazard* gempa.

Tipikal metode PHSA digambarkan dalam empat tahapan proses (Reiter, 1990) yang terdiri dari :

1. Identifikasi dan karakterisasi semua sumber gempa di suatu lokasi yang mungkin berpotensi menghasilkan *ground motion* yang signifikan. Karakterisasi sumber gempa termasuk pendefinisian tiap-tiap geometri sumber gempa, potensi gempa dan lokasi runtuhan yang terjadi di sekitar lokasi kajian. Pada kasus kebanyakan, distribusi probabilitas seragam dipergunakan untuk masing-masing zona sumber, dengan menganggap bahwa gempa yang terjadi memiliki besaran yang sama pada semua titik didalam zona sumber. Distribusi tersebut kemudian digabungkan dalam geometri sumber untuk mendapatkan distribusi probabilitas jarak sumber ke lokasi.

2. Karakterisasi korelasi perulangan kejadian gempa (*recurrence relationship*) mendefinisikan laju rata-rata akan terlampauinya suatu besaran gempa yang dipergunakan untuk karakterisasi tingkat gempa di masing-masing zona sumber. Parameter ini dapat dipergunakan untuk memprediksi nilai maksimum gempa dari sumber gempa.

3. Ground motion yang dihasilkan oleh gempa pada suatu lokasi dengan ukuran tertentu pada lokasi tertentu di setiap zona sumber harus ditentukan menggunakan *predictive relationship* dengan memperhitungkan faktor ketidakpastian.

4. Penggabungan perkiraan lokasi gempa, ukuran gempa dan parameter ground motion dengan memperhitungkan faktor ketidakpastian dilakukan untuk mendapatkan probabilitas parameter ground motion akan terlampaui/*exceeded* dalam selang waktu tertentu.

Pada penelitian ini hanya akan ditinjau analisis dengan menggunakan metoda probabilistik total yang memperhitungkan adanya ketidakpastian dari parameternya.

Rumus dasar Teori Probabilitas Total yang dikembangkan Mc Guire, 1976 adalah sebagai berikut :

dimana :

$$P[I \geq i] = \iint P[I \geq i; m, r] f_M(m). f_R(r). dm. dr \qquad (3)$$

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.

Persamaan ini kemudian dikembangkan untuk memodelkan sumber gempa tiga dimensi (3-D), dengan maksud agar hasil yang diperoleh lebih akurat.

$$P[I \geq i] = \int f_M(m) \int f_{LR}(l) \int P[I \geq i; m, r]. f_{R,M,LR}(r, m, l)\, dr.dl.dm \qquad (4)$$

Nilai intensitas I untuk kekuatan gempa M dan jarak sumber ke lokasi R ditentukan berdasarkan rumusan attenuasi yang dipakai. Nilai $P[I \geq i; m, r]$ dapat dikorelasikan dengan nilai *cumulative distribution function* (CDF) dengan persamaan :

$$P[I \geq i; m, r] = 1 - F_I(i) \qquad (5)$$

Nilai $F_I(i)$ tergantung dari distribusi probabilitas yang dipergunakan untuk mewakili besaran intensitas gempa dan parameter ground motion yang umumnya diasumsikan terdistribusi secara log normal.

Frekuensi kejadian gempa tahunan selalu mempertimbangkan adanya gempa minimum yang didefinisikan sebagai batas gangguan/kerusakan minimum yang terjadi pada suatu daerah. Batasan magnitude tersebut menjadikan perhitungan terhadap frekuensi kejadian gempa tahunan menurut (Mc Guire and Arabasz, 1990) adalah sebagai berikut:

$$N(m) = \nu \frac{\exp[-\beta(m - m_0)] - \exp[-\beta(m_{\max} - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{\max} - m_0)]} \qquad (6)$$

dimana $\nu = \exp(\alpha - \beta . m_0)$ (7)

m_0 = magnitude minimum, ditentukan = 5

Dari nilai frekuensi kejadian gempa tahunan tersebut dapat diturunkan nilai *probability density function*, yaitu :

$$f_M(m) = \frac{d}{dm} F_M(m) = \frac{\beta \exp[-\beta(m - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{\max} - m_0)]} \qquad (8)$$

dimana: $F_M(m) = \dfrac{N(m_0) - N(m)}{N(m_0) - N(m_{\max})}$ (9)

Probability Density Function untuk jarak f_R sangat ditentukan dari geometri sumber gempa yang juga tergantung pada kondisi geologi dan seismologi sumber gempa. Dalam analisa selanjutnya geometri sumber gempa dapat digambarkan dalam suatu model tertentu baik dalam bentuk 2-dimensi seperti sumber gempa titik, garis atau area maupun dalam bentuk 3-dimensi yang menggambarkan sumber gempa dalam bentuk geometri yang mendekati kondisi sesungguhnya.

Hasil analisis risiko gempa untuk kota Jakarta dapat dilihat pada **Gambar 3**. Dari gambar terlihat bahwa percepatan gempa di batuan dasar kota Jakarta untuk *uniform hazard* adalah sebesar 0.239 g. Mekanisme sumber gempa yang memberikan target spektra terbesar adalah mekanisme subduksi *Megathrust*. Untuk mekanisme Subduksi *Megathrust* PGA diperoleh sebesar 0.178 g, 0.164 g untuk mekanisme Subduksi *Benioff*, 0.109 g untuk mekanisme Shallow Crustal Fault dan 0.153 g untuk sumber *Shallow Background*.

6. Deagregasi

Untuk menghubungkan hasil analisis risiko gempa di atas dengan suatu pencatatan gempa tertentu diperlukan analisis deagregasi, yaitu menentukan magnitude (M) dan jarak (R) gempa yg paling dominan (*most likely*) dari beberapa sumber gempa yang diperhitungkan. Informasi jarak dan magnitude tersebut dipergunakan dalam mencari input *time histories* yang memiliki karakteristik yang mendekati kondisi yang diinginkan dan dipergunakan sebagai *input motion* dalam *spektral matching*. Pemilihan didasarkan atas karakteristik sumber gempa seperti mekanisme, magnitude dan jarak yang paling mendekati hasil deagregasi.

Karena program Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) dari USGS belum mempunyai program untuk deagregasi, maka pada penelitian ini digunakan hasil deagregasi untuk kota Jakarta yang telah dipublikasikan oleh Irsyam dkk., 2008. Dari penelitian tersebut diperoleh hasil deagregasi untuk periode ulang 500 tahun dengan T = 0.2 detik, seperti terlihat pada **Tabel 2**, dan rekomendasi time histories untuk tiap mekanisme gempa (**Tabel 3**).

Tabel 2. Rangkuman hasil deagregasi untuk periode ulang gempa 500 tahun

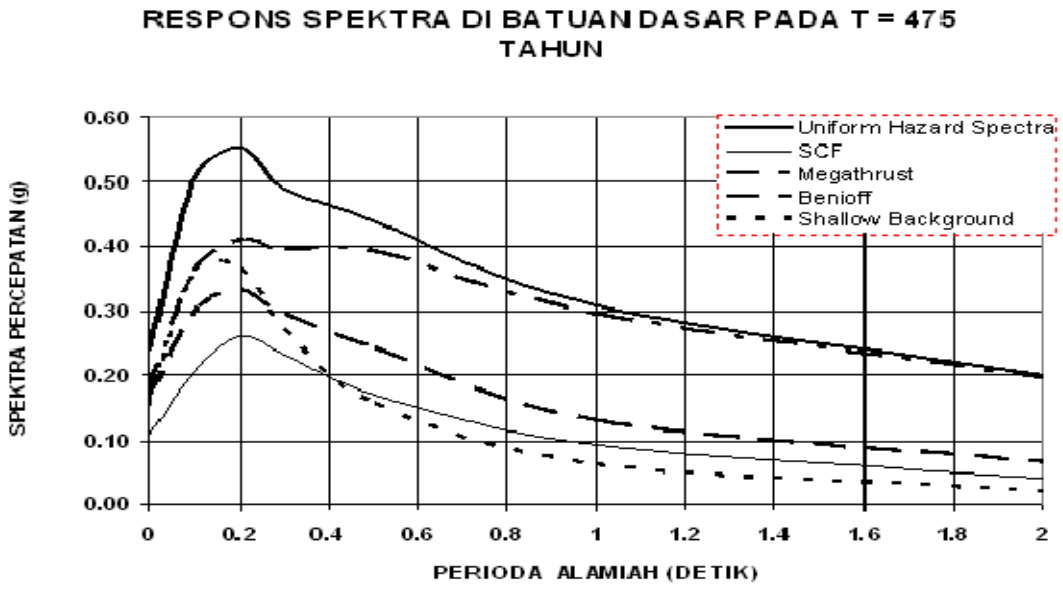
Zona Sumber Gempa	T = 0.2 detik	
	M	R
Benioff	8.2	223
Megathrust	8.3	225
SCF	6.7	57
Background	5.9	15

Sumber: Irsyam, dkk., 2008.

Tabel 3. Time histories yang direkomendasikan

Sumber Gempa	Kejadian	Magnitude	Jarak (km)	Sumber Data
Megathrust Benioff	Kocaeli, 1999	7.5	227	ERD
SCF	Landers, 1992	7.3	69	CDMG
Shallow Background	Mammoth Lakes, 1980	5.7	15	CDMG

Sumber: Irsyam, dkk., 2008.



Gambar 3. Grafik respon spektra percepatan di batuan dasar Jakarta berdasarkan mekanisme gempa

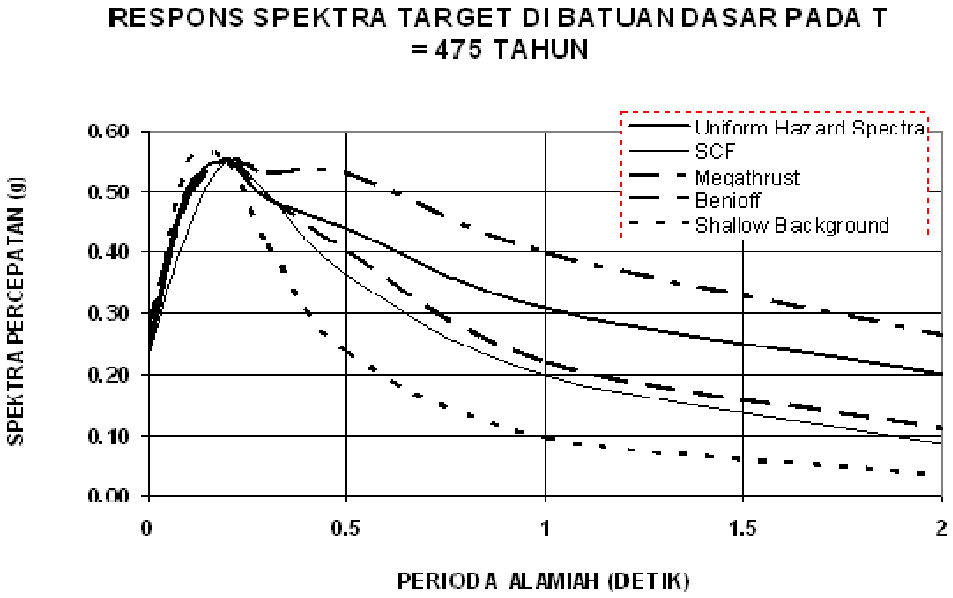
7. Pembuatan *Ground Motion* Sintetik

7.1 Target spektra

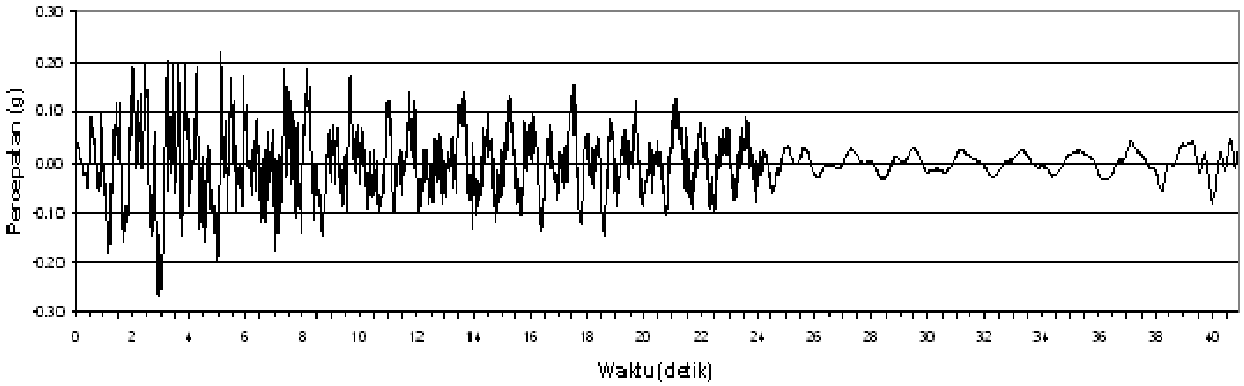
Langkah pertama dalam pembuatan ground motion sintetik adalah *scaling* respons spektra. Hasil respons spektra percepatan dari berbagai mekanisme sumber gempa (**Gambar 3**) kemudian diskalakan ke nilai respons spektra gabungan (*Uniform Hazard Spectra*) pada periode T = 0,2 detik. **Gambar 4** memperlihatkan respons spektra yang telah diskalakan tersebut, untuk selanjutnya dinamakan target spektra.

7.2 Spectral *matching analysis*

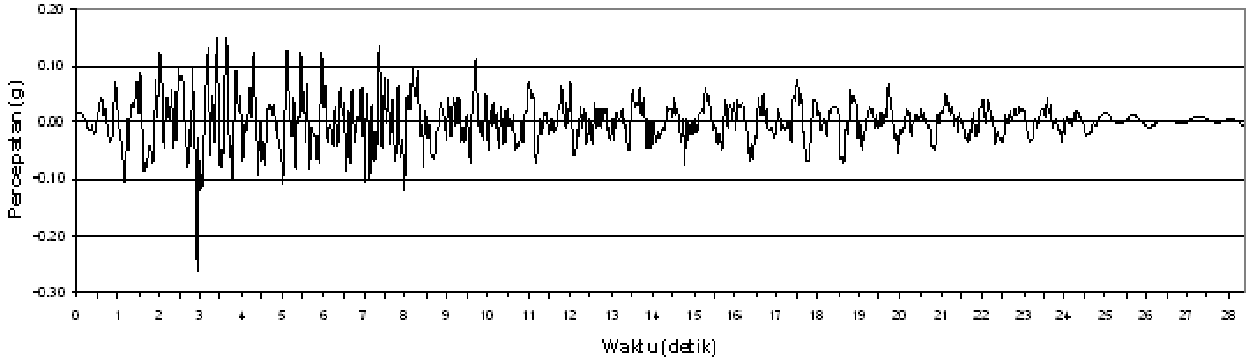
Metode yang sederhana dalam menentukan *ground motion* artifisial adalah dengan memodifikasi *ground motion* yang telah ada. Penskalaan ini dapat mengubah *ground motion* aktual ke tingkat goncangan yang lebih rendah atau lebih tinggi, sesuai dengan target spektra rencana (**Gambar 4**). Prosedur ini dinamakan *spectral matching analysis* (SMA). Dari *time histories* yang telah ditentukan dari proses deagregasi sebelumnya (gempa Kocaeli 1999 untuk *megathrust* dan *benioff*, gempa Mammoth Lakes 1980 untuk *Shallow Background*, serta gempa Landers 1992 untuk SCF), dilakukan SMA untuk mendapatkan time histories artifisial yang kemudian dipakai sebagai input motion pada tahapan analisa dinamik interaksi struktur-tanah. Pada penelitian ini digunakan program komputer SYNTH dalam proses SMA *ground motion* aktual ke dalam bentuk *ground motion* artifisial untuk kota Jakarta. Hasil keluaran program ini terlihat pada **Gambar 5** sampai dengan **Gambar 8**.



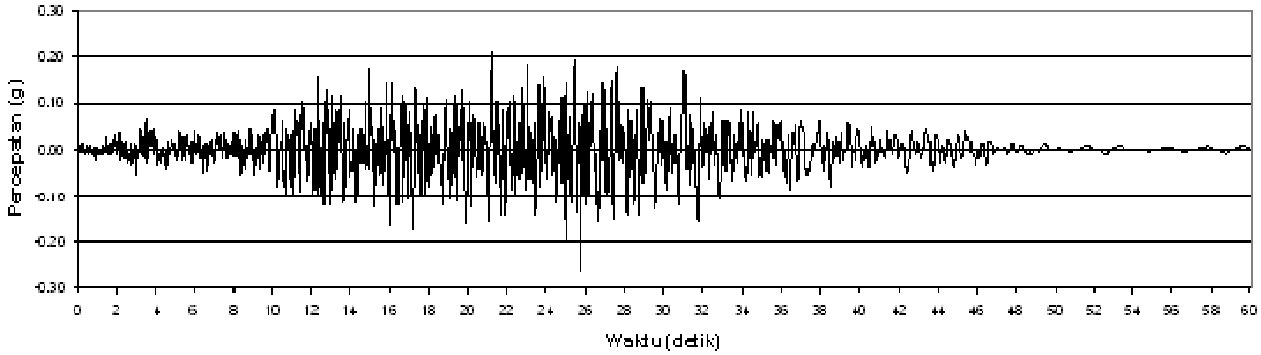
Gambar 4. Grafik target spektra percepatan di batuan dasar Jakarta berdasarkan mekanisme gempa



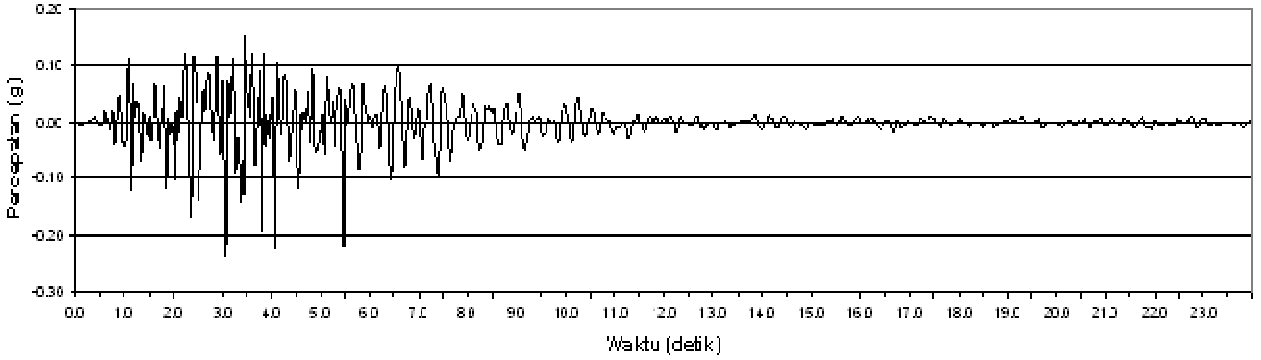
Gambar 5. Output SYNTH untuk Mekanisme *Megathrust*



Gambar 6. Output SYNTH untuk Mekanisme *Benioff*



7. Output SYNTH untuk Mekanisme *Shallow crustal Fault*



Gambar 8. Output SYNTH untuk Mekanisme *Shallow Background*

8. Kesimpulan

1. Analisa risiko gempa dengan model sumber 3D dengan program dari USGS untuk batuan dasar kota Jakarta memberikan hasil yang lebih besar, yaitu 0.239 g, dibanding dengan yang terdapat pada peta kegempaaan wilayah Indonesia SNI 03-1726-2002, dimana untuk Jakarta nilai PGA adalah 0.15 g**.** Nilai ini mendekati PGA 0.23 g, hasil penelitian Rudianto (2008) dan berada dalam range pata gempa usulan Irsyam dkk (2008) (0.20 g – 0.25 g). Tetapi nilai ini lebih kecil dibanding dengan PGA pada peta gempa Indonesia yang dipublikasikan oleh USGS dimana kota Jakarta berada pada zona dengan nilai PGA antara 0.245 g - 0.326 g.
2. Hasil analisis menunjukkan percepatan di batuan dasar untuk wilayah Jakarta untuk periode ulang 475 tahun adalah 0.239 g untuk *Uniform Hazard*. Kontribusi terbesar seismic hazard untuk kota Jakarta adalah akibat gempa Subduksi Megathrust. Untuk mekanisme Subduksi *Megathrust* PGA diperoleh sebesar 0.178 g, 0.164 g untuk mekanisme Subduksi *Benioff*, 0.153 g untuk mekanisme *Shallow Background* dan 0.109 g untuk mekanisme *Shallow Crustal Fault*. Nilai-nilai ini berlaku untuk pengaruh gempa dengan radius 500 km dari Jakarta dan kedalaman hingga 300 km.
3. Dengan bantuan program SYNTH diperoleh ground motion sintetik untuk kota Jakarta sesuai dengan masing-masing sumber gempa yang dapat dilihat pada **Gambar 5** sampai dengan **Gambar 8**.

Daftar Pustaka

Achdan, A., dan Sudana, D., 1992, *Peta Geologi lembar Karawang, Jawa, Skala 1:100.000*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Atkinson, G.M., and 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, Vol. 93, No. 4, pp 1703-1729.*

Badan Standardisasi Nasional (BSN), 2002, *SNI 03-1726-2002 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung,* Jakarta: BSN.

Boore, D.M., and Atkinson G.M., 2006, *Boore-Atkinson provisional NGA Empirical Ground-Motion Model for The Average Horizontal Component of PGA, PGV and SA at Spectral Periods of 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 2, 3, 4, and 5 seconds, v 1.7 (October, 2006),* Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, Berkeley: University of California.

Campbell, K.W., and Bozorgnia, Y., 2006. *Campbell-Bozorgnia NGA Empirical Ground Motion Model for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and SA at Selected Spectral Periods Ranging from 0.01–10.0 Seconds (Version 1.1)*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, Berkeley: University of California.

Chiou, Brian S.J., Youngs, and Robert, R., 2006. *Chiou and Youngs PEER-NGA Empirical Ground Motion Model for the Average Horizontal Component of Peak Acceleration and Pseudo-Spektral Acceleration for Spektral Periods of 0.01 to 10 Seconds,* Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, Berkeley: University of California.

Gardner, J.K., and Knopoff, L., 1974, Is the sequence of earthquakes in Southern California, with Aftershocks Removed, Poissonian?. *Bull. Seismol. Soc. Am. 64, 1363–1367.*

Harmsen, Stephen, 2007, *USGS Software for Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) Draft Document*. USGS.

Irsyam, M., et al., 2008, *Usulan Ground Motion untuk Batuan dasar Kota Jakarta dengan Periode Ulang Gempa 500 Tahun untuk Analisis Site Specific Response Spectra*, Seminar & Pameran HAKI 2008 "Pengaruh Gempa & Angin terhadap Struktur".

Irsyam, M., et al., 2008, Proposed Seismic Hazard Maps of Sumatera and Java Islands and Micro-zonation Study of Jakarta city, Indonesia", *Journal Earth Syst.* Sci. 117, S2, November 2008, pp. 865-878.

Kertapati, E.K, 2006 *Aktivitas Gempa Bumi di Indonesia,* Bandung: Pusat Survei Geologi.

Kramer, S.L., 1996, *Geotechnical Earthquake Engineering,* Upper Saddle River, New Jersey 07458: Prentice Hall, Inc.

Martodjojo, S., dan Pulunggono, A., 1994, *Perubahan Tektonik Paleogen - Neogen Merupakan Peristiwa Tektonik Terpenting di Jawa*, Kumpulan Makalah Seminar Geologi dan Geotektonik Pulau Jawa Sejak Akhir Mesozoikum sampai Kuarter, Yogyakarta: UGM, p. 1-15.

McGuire, R.K., 1976, *FORTRAN Computer Program for Seismic Risk Analysis*, US Geological Survey Open File Report, pp. 67-76.

McGuire, R.K. and Arabasz, W.J., 1990, *An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis,* In S.H. ward, ed. Geotechnical and Environtmental Geophysics, Society of Exploration Geophysicist, Vol. 1, pp.333-353.

Pacheco, J.F., and Sykes, L.R., 1992, Seismic Moment Catalog of Large, Shallow Earthquakes, 1900 – 1989. *Bull. Seismol. Soc. Am.,* 82, 1306 - 1349.

Petersen, M., et al. 2004. *Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Sumatera, Indonesia & Across the Southern Malaysian Peninsula,* U.S.A.: U.S. Geological Survey.

Petersen, M., et al. 2007, *Documentation for the Southeast Asia Seismic Hazard Maps*, U.S.A.: U.S. Geological Survey.

Reiter, L., 1990, *Earthquake Hazard Analysis – Issues and Insights*, New York: Columbia University Press, 254 pp.

Rudianto, S., Rathje, E., and Soedjono, B., 2008. Site-specific Seismic Analysis for Deep Alluvial Jakarta Site, Indonesia, *Proceedings of International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation*, Jakarta: April 14-15, 2008, P.381-388.

Sieh, K., and Natawidjaja, D., 2000, Notectonic of the Sumatran Fault, Indonesia, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, No. B12, pp. 28295-28326.

Simandjuntak, T.O., dkk, 1996, *Peta Geologi Indonesia skala 1:5.000.000*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

U.S. Geological Survey, 2009, *Earthquake Hazard Program*, USGS Website.

Wells, D.L., and Coppersmith, K.J., 1994, New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002.

Youngs, R.R., Chiou, S.J., Silva, W.J., and Humphrey, J.R., 1997, *Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes,* Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1, pp. 58-73.

Zhao, J.X., et al. 2006, *Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period*, Bulletin of the Seismological Society of America, Jun 2006, 96: 898 - 913.