

ANALISIS SEISMISITAS UNTUK SEMENANJUNG MURIA

**(Masyhur Irsyam Agus Himawan)¹
(Berny A. Subki, Hadi Suntoko)²**

Abstrak

ANALISIS SEISMISITAS UNTUK SEMENANJUNG MURIA. Semenanjung Muria mempunyai potensi untuk menjadi kawasan penting di masa mendatang. Makalah ini menyajikan studi kegunaan untuk daerah Semenanjung Muria mulai dari kondisi geologi, analisis risiko gempa, pembuatan digitasi sintetis serta perambatan gelombang gempa dari batuan dasar ke permukaan. Sumber-sumber gempa, dimana dianggap memberikan kontribusi yang signifikan dalam analisis risiko gempa, mencakup seluruh sumber gempa sampai kedalaman fokus 200 km pada daerah dengan radius 500 km dari Semenanjung Muria. Mekanisme gempa yang terjadi di daerah ini pada umumnya dapat dibedakan atas patahan-patahan di Laut Jawa dan gempa-gempa subduksi di sebelah selatan Pulau Jawa. Analisis risiko gempa dilakukan berdasarkan teori probabilitas total untuk berbagai periode ulang gempa. Untuk dapat menggambarkan mekanisme gempa yang terjadi sehingga memberikan hasil analisis yang sesuai, digunakan dua fungsi atenuasi, yaitu : (i) fungsi atenuasi yang dikembangkan oleh Boore et al. (1997) dan (ii) fungsi atenuasi yang diusulkan oleh Youngs et al. (1997).

Input motion yang digunakan untuk perambatan gelombang diperoleh dengan membuat digitasi percepatan sintetis di batuan dasar. Pembuatan digitasi sintetis dilakukan dengan menggunakan teorema gerakan acak.

Analisis perambatan gelombang geser dari batuan ke permukaan dilakukan untuk mengetahui respons deposit tanah permukaan akibat motion di batuan dasar. Dari analisis ini diperoleh percepatan maksimum dan spektrum respons elastik di permukaan yang dapat digunakan sebagai input untuk penentuan beban gempa pada bangunan dan untuk analisis dinamik.

Abstract

SEISMICITY ANALYSIS OF MURIA PENINSULA. Muria Peninsula has a potential value to be an important region in the future. This paper describes seismicity study of the Peninsula starting from its geology, seismic risk analysis, synthetic digitization, and finally seismic attenuation study from base rock to the ground.

Seismic sources, which contribute significant values within such analysis cover every single seismic source up to 200-km depth, in 500-km radius of Muria Peninsula. Seismic mechanism which occupy this region in general can be divided into, Java sea faults system and subduction triggered faults of southern Java. Seismic risk analysis was done based on total probability theory under varieties condition for recurrence interval. In order to elucidate real seismic mechanism, two attenuation functions was used : (i) attenuation function developed by Boore et al. (1997), and (ii) attenuation function developed by Youngs et al. (1997).

Motion input was utilized in wave attenuation in order to digitize synthetic velocity in the base rock. To establish synthetic digitization, random mechanism theory was used respectively.

Shear wave attenuation analysis from base rock to the upper ground is conducted to understand the response of ground soil layers triggered by such motions. From this analysis maximum acceleration and elastic response was solved, which can be used as input to define structure seismic loads and dynamic analysis.

¹ Dosen / Peneliti Jurusan Teknik Sipil, ITB

² Bidang Penerapan Sistem Energi P2EN -BATAN

I. PENDAHULUAN

Dilihat dari kondisi seismologi, Indonesia merupakan daerah yang mempunyai risiko gempa yang cukup tinggi karena posisinya yang berada pada tapal batas empat sistem tektonik aktif, yakni tapal batas lempeng Eurasia, lempeng Australia, lempeng Filipina dan lempeng Pasifik. Disamping itu wilayah Indonesia terletak pada pertemuan dua sistem pegunungan, yaitu sistem pegunungan Mediterania yang terbentang di Pulau Sumatra, Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara, dan sistem pegunungan Pasifik yang ada di Pulau Halmahera dan Sulawesi. Berdasarkan hasil pencatatan gempa selama satu abad ini, rata-rata sepuluh gempa merusak terjadi setiap tahunnya di Indonesia. Sehubungan dengan hal tersebut di atas, bangunan-bangunan penting terutama yang menyangkut kepentingan umum harus dirancang secara aman terhadap gempa. Hal ini dilakukan berkaitan dengan aspek keamanan dan jaminan investasi.

Penentuan aspek keamanan terhadap kejadian gempa sangat dipengaruhi oleh aspek struktur dan aspek geoteknik. Sebagai contoh, dari aspek geoteknik, seperti terlihat pada saat Gempa Mexico City 1985 dan Loma Prieta, California 1989, pola-pola kerusakan (keruntuhan) yang terjadi berkaitan erat dengan respon dinamis dari tanah lempung maupun pasir setempat.

Semenanjung Muria mempunyai potensi untuk menjadi kawasan penting di masa mendatang. Hal ini dikaitkan dengan kemungkinan dijadikannya daerah ini sebagai daerah sumber energi bagi kawasan Pulau Jawa. Kesiapan daerah ini, menyangkut keamanan dan kepentingan masyarakat banyak, menjadi syarat mutlak bagi pembangunan yang akan dilakukan. Untuk itu, kondisi daerah Semenanjung Muria secara umum perlu dikaji lebih jauh, termasuk masalah geologi dan kegempaan setempat. Meskipun studi secara makro tentang tingkat kegempaan untuk daerah ini telah dilakukan pada saat pembuatan peta percepatan gempa untuk Indonesia, studi lebih lanjut mengenai kondisi geologi dan kegempaan regional perlu dilakukan untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.

Makalah ini menyajikan studi seismisitas mencakup studi kondisi geologi dan kegempaan, analisis risiko gempa dan perambatan gelombang geser dari batuan dasar ke permukaan di Semenanjung Muria yang berada pada posisi sekitar 6.43 LS dan 110.87 BT.

Pada perambatan gelombang geser tersebut, *input motion* diperoleh melalui pembuatan *time-histories* percepatan gempa sintetis berdasarkan Teorema Gerakan Acak dari Gasparini D.A. dan Vanmarcke, E.H., 1976.

Penentuan gempa rencana (*design earthquake*) berkaitan erat dengan periode ulang gempa yang akan diperhitungkan selama masa layan bangunan. Hal ini merepresentasikan tingkat pembebanan akibat gempa pada perencanaan bangunan. Perkiraan percepatan maksimum, yang menjadi dasar penentuan beban gempa, biasanya dilakukan pada dua tingkatan gempa rencana yang berkaitan dengan masalah *serviceability* dari bangunan, yaitu gempa rencana maksimum

(*maximum design earthquake*) dan gempa rencana ekstrim (*extreme design earthquake*). Untuk kasus rencana pembangunan fasilitas nuklir sesuai dengan prosedur Safety Standards IAEA, kedua jenis gempa tersebut selanjutnya dapat diimbangi fenomenanya dengan format desain yang disebut *Operating Basis Earthquake* untuk gempa maksimum, dan *Safe Shutdown Earthquake* untuk gempa ekstrim.

Pada gempa rencana maksimum, estimasi percepatan maksimum dilakukan dengan menggunakan beberapa pendekatan, yaitu :

- a. berdasarkan intensitas (tingkat kerusakan) yang terbesar yang pernah terjadi di lokasi studi
- b. berdasarkan magnitud terbesar yang pernah terjadi
- c. berdasarkan pada pendekatan probabilistik.

Sedangkan percepatan maksimum yang terjadi pada tingkatan gempa rencana ekstrim ditentukan dari kejadian gempa terbesar yang mungkin terjadi berdasarkan sejarah kegempaan dan struktur seismotektonik pada batuan dasar.

Makalah ini menyajikan analisis risiko gempa untuk mendapatkan percepatan maksimum dan spektrum respons di batuan dasar pada tingkatan gempa rencana maksimum berdasarkan pendekatan probabilistik.

II. PEMBAHASAN

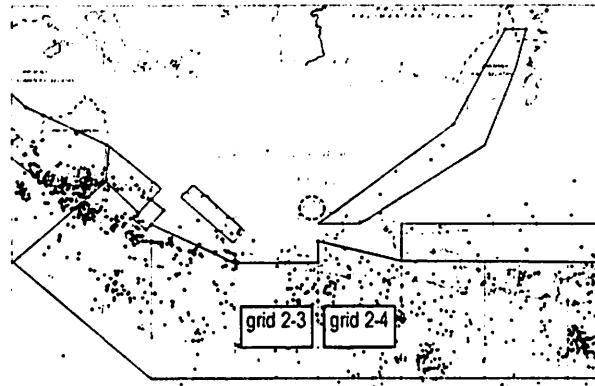
II. 1. Kondisi Geologi dan Kegempaan Regional

Berdasarkan pencatatan kejadian gempa di sekitar Semenanjung Muria yang dikumpulkan dari berbagai katalog dari lembaga kegempaan seperti Badan Meteorologi dan Geofisika Jakarta dan *U.S. Geological Survey (USGS)*, diketahui ada dua mekanisme kegempaan yang mempengaruhi tingkat risiko gempa daerah Semenanjung Muria, yaitu gempa-gempa *shallow crustal* dan gempa-gempa pada zona subduksi.

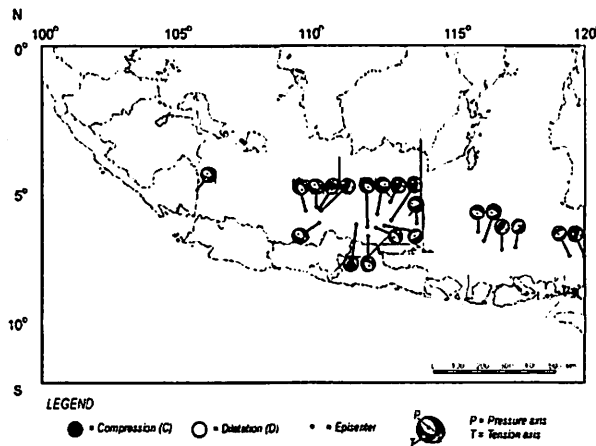
Gempa-gempa *shallow crustal* terjadi pada kedalaman 0-50 m di daerah utara dan timur Semenanjung Muria dan di sekitar laut Jawa. Sedangkan zona subduksi yang terletak pada jarak sekitar 400 km dari Muria bermula dari Samudra Hindia sekitar 250 km arah selatan Pulau Jawa dari kedalaman 50 km sampai kedalaman 150 km di bawah laut Jawa (Gambar 1). Mekanisme patahan pada zona-zona di atas dapat dilihat dalam Gambar 2 – 4 (SEASEE, *Series on Seismology*, Volume V 1985). Dari arah sudut dip dan kedalaman epicenter gempa, zona subduksi ini terbagi lagi menjadi 3 zona, yaitu *megathrust-shallow* dan *megathrust-intermediate* dimana masing-masing mempunyai sudut dip 11° dan 14° sampai kedalaman 100 km, dan zona *benioff* dengan besar sudut dip 26° sampai kedalaman sekitar 200 km (Gambar 5a – 5b).

II. 2. Atenuasi Gelombang Gempa

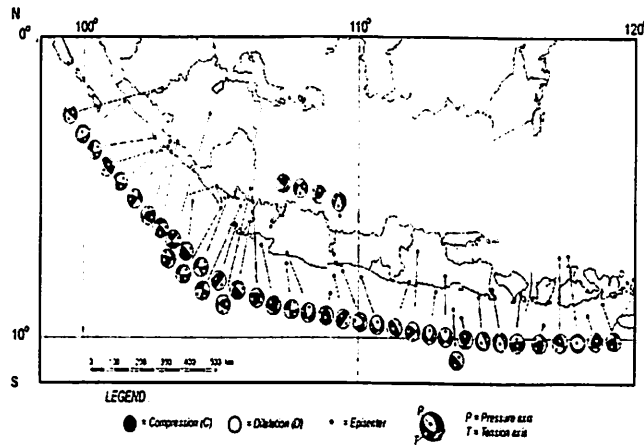
Intensitas (percepatan maksimum, kecepatan maksimum lama guncangan, dll.) yang terjadi pada risiko gempa tertentu untuk suatu lokasi sangat tergantung dari besarnya gempa dan jarak episenter dari lokasi tersebut. Hal ini sering dinyatakan sebagai pola pelemahan (atenuasi), yang mencerminkan besarnya intensitas tersebut pada suatu lokasi akibat kejadian gempa di daerah sumber dengan besar M yang berjarak R dari lokasi tersebut.



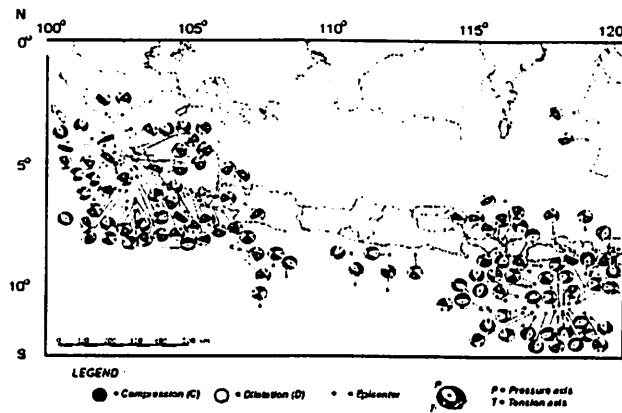
Gambar 1. Peta Seismotektonik di Sekitar Pulau Jawa



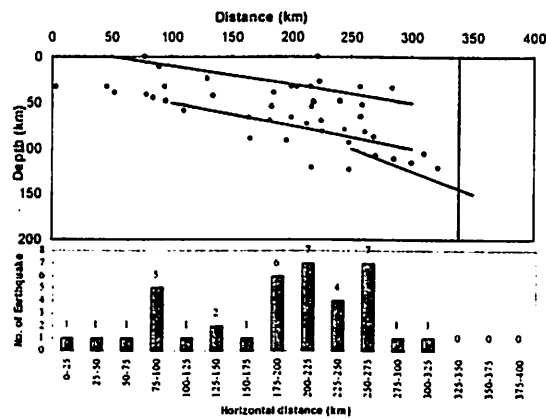
Gambar 2. Mekanisme Patahan untuk Gempa-Gempa Dalam ($M > 5.0$) Periode 1934 – June 19834 (SEASEE, Series on Seismology, Volume V 1985)



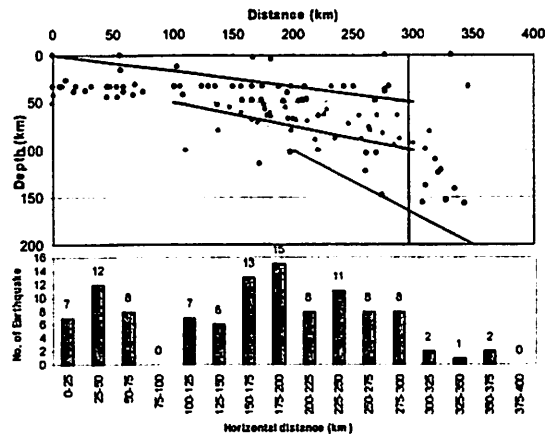
Gambar 3. Mekanisme Patahan untuk Gempa-Gempa Intermediate ($M > 5.0$) Periode 1934 – June 1983 (SEASEE, Series on Seismology, Volume V 1985)



Gambar 4. Mekanisme Patahan untuk Gempa-Gempa Dangkal ($M > 5.0$) Periode 1934 – June 1983 (SEASEE, Series on Seismology, Volume V 1985)



Gambar 5a. Grafik Distribusi Episenter Gempa di Zona Subduksi (Grid 2-3)



Gambar 5b. Grafik Distribusi Episenter Gempa di Zona Subduksi (Grid 2-4)

Memperkirakan pola atenuasi ini, telah menjadi subyek yang menarik dalam penelitian bidang kegempaan. Pola atenuasi sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti tersebut di bawah ini :

1. Mekanisme gempa
2. Jarak pusat gempa
3. Kondisi geologi
4. Penurunan fungsi atenuasi

Dalam perkembangan ilmu kegempaan, telah banyak diusulkan beberapa fungsi atenuasi oleh banyak peneliti, antara lain : Esteva (1970), Donovan (1974), McGuire (1974), Boore et. al. (1981, 1988 dan 1997) dan Youngs et.al. (1997). Fungsi-fungsi tersebut diturunkan berdasarkan data pengamatan kegempaan di masa yang lalu dengan memakai metode penyesuaian kuadrat terkecil terhadap data pengamatan terbesar.

Dengan memperhatikan beberapa faktor di atas, fungsi atenuasi yang digunakan dalam studi ini dibedakan untuk masing-masing mekanisme gempa. Fungsi atenuasi dari Joyner, Boore dan Fumal (1997) digunakan dalam menganalisis pengaruh gempa-gempa *shallow crustal*. Sedangkan untuk gempa pada zona subduksi, digunakan fungsi atenuasi Youngs et.al (1997). Fungsi atenuasi tersebut dipilih selain karena memang belum ada fungsi atenuasi yang diturunkan berdasarkan gempa-gempa di Indonesia, juga karena keduanya mempunyai rentang deviasi yang kecil serta diturunkan berdasarkan mekanisme gempa yang mirip dengan kondisi seismotektonik di sekitar Pulau Jawa. Kedua fungsi tersebut digunakan untuk memperkirakan percepatan maksimum dan spektrum respons di batuan dasar. Dua karakteristik gelombang gempa ini diperlukan untuk membuat digitasi sintesis.

Fungsi atenuasi dari Joyner, Boore dan Fumal (1997) untuk memperkirakan percepatan maksimum dan respons spektrum di batuan dasar mempunyai bentuk persamaan sebagai berikut:

a. Percepatan Maksimum

$$\ln(y) = b_1 + 0.527(M - 6) - 0.778 \ln r - 0.371 \ln \frac{V_s}{1396} \quad (1)$$

$$r = \sqrt{r_{jb}^2 + 5.57^2}$$

b. Spektrum Respons

$$\ln(\text{PGA}) = b_1 + 0.527(M - 6) - 0.778 \cdot \ln(R) - 0.371 \cdot \ln \frac{V_s}{V_A} \quad (2)$$

Untuk sumber-sumber gempa yang berada pada zona subduksi, analisis risiko gempa untuk memperkirakan percepatan maksimum dan respons spektrum di batuan dasar dilakukan dengan menggunakan rumus yang diusulkan oleh Youngs et al. (1997). Fungsi ini diturunkan berdasarkan data dari gempa-gempa subduksi di Amerika, Cascadia dan Meksiko, dapat dinyatakan dalam persamaan berikut :

a. Percepatan Maksimum

Untuk batuan:

$$\ln(y) = 0.2418 + 1.414M - 2.553 \ln(r_{rup} + 1.7818e^{0.554M}) + 0.00607H + 0.3846Z_T \quad (3)$$

$$\sigma_z = 1.45 - 0.1M$$

Untuk tanah :

$$\ln(y) = -0.6687 + 1.438M - 2.329 \ln(r_{rup} + 1.097e^{0.617M}) + 0.00648H + 0.3643Z_T \quad (4)$$

$$\sigma_z = 1.45 - 0.1M$$

b. Spektrum Respons

$$\ln(\text{PGA}) = 0.2418 + 1.414 \cdot M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.7818e^{0.554M}) + 0.00607H + 0.3846 \cdot Z_T \quad (5)$$

II. 3. Gempa Rencana Maksimum

Seperti telah disinggung pada pendahuluan di atas, analisis risiko gempa yang dilakukan pada studi ini dilakukan untuk memperkirakan percepatan maksimum dan spektrum respons pada tingkatan gempa rencana maksimum dengan menggunakan pendekatan probabilistik. Aspek geoteknik dalam analisis risiko gempa dikaitkan dengan fenomena geoteknik seperti mekanisme patahan, *seismological setting*, dan atenuasi perambatan gelombang gempa di batuan dasar. Beberapa tinjauan yang dilakukan dalam analisis risiko gempa adalah:

- a. Analisis kondisi geologi, seperti lokasi sumber-sumber gempa dan mekanisme patahan.
- b. Pemodelan daerah sumber gempa berdasarkan mekanisme patahan yang terjadi.
- c. Pemilihan fungsi atenuasi yang sesuai dengan kondisi geologi setempat.
- d. Pemilihan model perhitungan, baik statistik maupun deterministik.

II. 3. 1. Risiko Gempa

Peristiwa gempabumi merupakan gejala alam yang bersifat acak yang tidak dapat ditentukan dengan pasti mengenai besar, tempat dan waktu terjadinya. Dengan konsep probabilitas, terjadinya gempa dengan intensitas dan periode ulang tertentu dapat diperkirakan. Angka kemungkinan (*probability*) inilah yang mencerminkan risiko gempa.

Risiko tahunan (R_A) dari suatu intensitas adalah angka kemungkinan terjadinya atau terlampauinya intensitas tersebut dalam jangka waktu (tahun) tertentu. Sedangkan periode ulang rata-rata (T) dari suatu intensitas merupakan perbandingan terbalik dari risiko tahunan. Jika risiko tahunan untuk suatu intensitas tertentu diketahui, maka :

$$T = \frac{1}{R_A} \quad (6)$$

Risiko gempa (R_N) didefinisikan sebagai kemungkinan terjadinya gempa dengan intensitas dan periode ulang tertentu selama masa layan bangunan (N tahun). Dengan asumsi bahwa risiko-risiko dalam tahun-tahun yang berurutan tidak saling bergantung, maka hubungan antara risiko per tahun (R_A), dan risiko dalam jangka waktu N tahun (R_N), dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$R_N = 1 - (1 - R_A)^N \quad (7)$$

Penentuan gempa rencana berkaitan erat dengan periode ulang gempa yang akan diperhitungkan selama masa layan bangunan (n). Hal ini merepresentasikan tingkat pembebanan akibat gempa pada perencanaan bangunan. Pada studi ini, analisis risiko gempa dilakukan untuk mengetahui percepatan maksimum (PGA) dan spektrum respons di batuan dasar akibat gempa dengan periode ulang 200, 500, 1.000, 2.500, 5.000 dan 10.000 tahun (OBE).

II. 3. 2. Model Matematika

Teorema probabilitas total yang digunakan untuk memecahkan masalah risiko gempa dan masalah rekayasa telah dikembangkan oleh beberapa peneliti, diantaranya adalah *Cornel (1968)*, *McGuire (1976)*.

Teorema probabilitas total yang dikembangkan oleh McGuire (1976), mengambil asumsi harga kekuatan gempa (M), jarak hiposenter (R) sebagai variabel acak bebas yang menerus (*continuous independent random variable*).

Teori ini mengambil bentuk:

$$P[I \geq i] = \int \int_{r, m} P[I \geq i | M \text{ dan } R] \cdot f_M \cdot f_R \, dm \, dr \quad (8)$$

dengan:

f_M = independent probability dari M; 'density function' dari kekuatan gempa

f_R = independent probability dari R; 'density function' dari jarak hiposenter

$P[I \geq i | M \text{ dan } R]$ = probabilitas berkondisi dari intensitas I yang sama atau lebih besar dari intensitas i di suatu lokasi, dengan kekuatan gempa M dan jarak hiposenter R

f_M ditentukan berdasarkan tingkat kejadian rata-rata tahunan. Tingkat kejadian rata-rata tahunan dari gempa yang mempunyai besaran (magnitud) sama dengan atau lebih besar dari M pada suatu daerah sumber gempa, mempunyai hubungan sebagai berikut (*Gutenberg-Richter, 1956*):

$$\log_{10} n(M) = a - b M \quad (9)$$

dimana:

$n(M)$ = tingkat kejadian tahunan rata-rata (*mean annual rate of exceedence*)

10^a = tingkat kejadian tahunan untuk gempa dengan magnitud lebih besar dari 0

b = konstanta yang menunjukkan kemungkinan relatif tentang besar kecilnya (magnitud) gempa yang terjadi

Probabilitas bebas dari jarak hiposenter, f_R tergantung dari luas area setiap model sumber. Sedangkan $P[I \geq i | M \text{ dan } R]$ pada persamaan (8) tersebut, ditentukan dengan menggunakan fungsi atenuasi dengan menganggap seluruh kejadian gempa terdistribusi normal. Jika tingkat kejadian rata-rata tahunan gempa dengan magnitud lebih besar atau sama dengan magnitud minimum untuk tiap daerah sumber diketahui ($N_1(M \geq m_0)$), maka probabilitas total tahunan dari kejadian-kejadian dengan intensitas i sama atau lebih besar dari i pada suatu lokasi adalah dengan menjumlahkan angka kemungkinan seluruh area sumber gempa. Dalam bentuk matematis:

$$N_A = \sum_{i=1}^n N_1(M \geq m_0) P[I \geq i] \quad (10)$$

dengan:

N_A = tingkat kejadian tahunan total dari kejadian-kejadian dengan $I \geq i$ pada suatu lokasi

$P\{I \geq i\}$ = risiko kejadian tunggal untuk intensitas i yang sama atau lebih besar dari intensitas i di lokasi untuk satu daerah sumber gempa

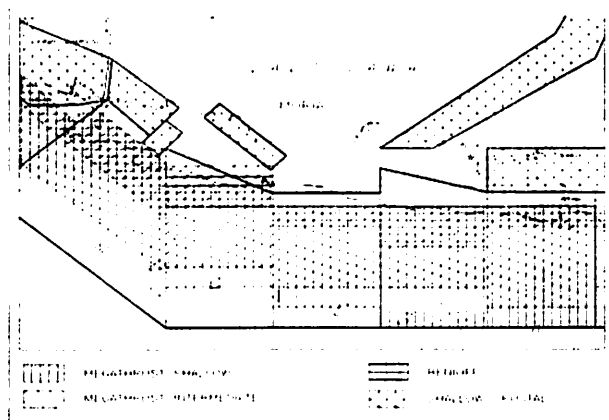
$NI (M \geq m_0)$ = tingkat kejadian tahunan dari gempa yang mempunyai $M \geq m_0$ untuk satu daerah sumber gempa

Besarnya nilai risiko tahunan apabila seluruh kejadian gempa diasumsikan mengikuti Pola Kejadian Poisson adalah sebagai berikut:

$$R_A = 1 - e^{-N_A} \quad (11)$$

II. 4. Pemodelan Sumber Gempa

Pemodelan sumber gempa akan memberikan gambaran potensi gempa di masa yang akan datang dalam bentuk distribusi pusat-pusat gempa, dimensi bidang patahan (*rupture sizes*), dan frekuensi kejadian gempa. Berdasarkan model sumber gempa tersebut akan didapat parameter-parameter gempa yang sangat diperlukan untuk dapat memberikan gambaran secara utuh tentang aktivitas suatu gempa yang mungkin terjadi di kerak bumi pada suatu lokasi (Irsyam, 1999). Berdasarkan kondisi geologi dan kegempaan di sekitar Semenanjung Muria seperti telah diuraikan pada Bab II di atas, pemodelan sumber gempa dilakukan seperti dalam Gambar 6 di bawah ini.

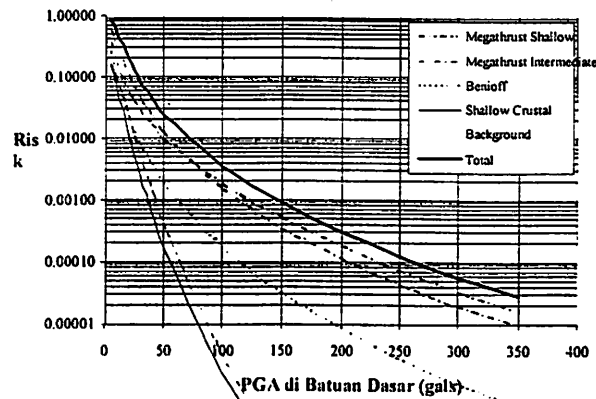


Gambar 6. Pemodelan Sumber-sumber Gempa yang Mempengaruhi Risiko Gempa di Semenanjung Muria

Selain itu untuk memperhitungkan kontribusi gempa-gempa di sekitar Muria yang berada pada daerah fault yang tidak termasuk dalam pemodelan sumber gempa di atas, digunakan *background zone* dengan radius 150 km dari Semenanjung Muria. Magnitude gempa maksimum yang terjadi pada zone ini diperkirakan sekitar 6.5 skala Richter (DACREA, 1996) dengan frekuensi kejadian gempa diperkirakan sebesar 0,002 kejadian/tahun berdasarkan peta frekuensi kejadian gempa dari laporan Beca Carter Hollings & Ferner (1977).

II. 4. 1. Hasil Analisis Risiko Gempa untuk Semenanjung Muria

Pada studi ini analisis risiko gempa, untuk menentukan percepatan maksimum dan spektrum respons di batuan pada tingkatan gempa rencana maksimum, dilakukan dengan pendekatan probabilistik dengan bantuan program *Modified EQRISK* (McGuire. R.K, 1976 dan Firmansjah, 1998). Hasil analisis dapat dilihat dalam Gambar 7.



Gambar 7. Hasil Analisis Risiko Gempa untuk Berbagai Periode Ulang

Berdasarkan grafik tersebut di atas, diketahui bahwa gempa dengan periode ulang 10.000 tahun (annual risk 0,0001) menghasilkan percepatan maksimum sebesar 262 gal. Gempa dengan periode ulang 10.000 tahun ini sering diperhitungkan dalam perencanaan bangunan-bangunan khusus yang diharuskan mempunyai tingkat keamanan yang sangat tinggi.

II. 4. 2. Gempa Rencana Maksimum

Perkiraan percepatan maksimum pada tingkatan gempa rencana ekstrim dilakukan secara deterministik berdasarkan lokasi patahan-patahan di sekitar Semenanjung Muria. Patahan-patahan tersebut sudah diidentifikasi pada studi yang dilakukan oleh Newjec. Inc., 1996. Hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perhitungan PGA di Batuan Dasar Semenanjung Muria Berdasarkan Gempa Rencana Ekstrim (S-2)

Fault	Length (km)	Style of Fault	Distance (km)	M _w	PGA**	
					V _s = 1070 m/s	V _s = 620 m/s
Muria S1	21	SS	9	6.61	211.38	258.82
Muria S2	17	SS	13	6.48	158.27	193.79
Muria S3	6	N	11	5.89	128.56	157.41
Muria S4	11	SS	8	6.23	185.37	226.96
Muria S5	10	SS	12	6.18	142.02	173.89
Muria S6	23	N	13	6.66	173.41	212.32
Muria S7	23	SS	26	6.66	106.11	129.92
Muria S8	22	SS	26	6.63	104.69	128.19
Muria S9	17	N	15	6.48	143.78	176.05
Muria S10	18	N	20	6.52	119.46	146.26
Muria S11	22	SS	27	6.63	101.79	124.63
Muria S1-11	52	SS	9	7.13	277.99	340.38
Muria S2-3	25	SS	12	6.71	187.31	229.34
Muria S5-10	37	N	13	6.93	200.19	245.11
Muria S7-8	45	SS	26	7.04	129.95	159.13
North Semarang	69	SS	16	7.29	209.99	257.11
N-S Semarang	123	SS	16	7.62	250.06	306.18
W-E Lasem	103	SS	56	7.52	93.14	114.04
Offshore Pati	150	SS	43	7.73	127.81	156.49
Offshore AF-1	26	N	46	6.73	71.48	87.52
Offshore AF-2	26	N	47	6.73	70.31	86.09
Offshore AF-3	20	N	53	6.58	59.23	72.52
Offshore AF-4	15	SS	72	6.41	42.86	52.48
Offshore AF1+4	55	SS	55	7.16	78.14	95.67
Background Eq 1	-	SS	5	6	201.18	246.33
Background Eq 2	-	SS	5	6.5	261.83	320.59
Background Eq 3	-	SS	5	6.8	306.68	375.50
Background Eq 4	-	SS	5	4	70.12	85.85
Volcano Eq	-	SS	25	5	45.61	56.84
Pati Earthquake 1	-	SS	48	6.8	71.87	88.00
Pati Earthquake 2	-	SS	48	6.8	71.87	88.00

II. 5. Pembuatan *Time-Histories* Percepatan Sintetik

Pada saat kejadian gempa, gelombang gempa (*motion*) yang ditimbulkan bersifat acak selama durasi tertentu. Hal ini tercatat dalam bentuk data *time-histories* percepatan gempa. Mengingat keterbatasan alat, pencatatan pada setiap kejadian gempa di Indonesia bisa dikatakan sangat langka, termasuk untuk daerah Semenanjung Muria. Hal ini mengakibatkan tidak adanya data *motion* yang dapat mewakili dan digunakan dalam analisis perambatan gelombang.

Dengan menggunakan teorema gerakan acak, gelombang gempa (*motion*) dapat disimulasikan. Faktor-faktor yang mempengaruhi pembuatan gelombang ini adalah: (i) percepatan maksimum, (ii) durasi dan kurva intensitas serta (iii) karakteristik (rentang) frekuensi yang diwakili dalam bentuk spektrum respons gelombang gempa di batuan dasar.

Pendekatan yang digunakan dalam pemodelan ini didasarkan pada pemikiran bahwa setiap fungsi periodik dapat dinyatakan dalam sebuah deret gelombang sinusoida atau deret Fourier.

$$x(t) = \sum_n A_n \cdot \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (12)$$

Amplituda A_i dihubungkan dengan *spectral density function* $G(\omega)$ mengikuti bentuk sebagai berikut :

$$G(\omega_n) \Delta\omega = \frac{A_n^2}{2} \quad (13)$$

Spectra density function dapat dinyatakan berdasarkan suatu spektrum respons target dengan mengikuti hubungan sebagai berikut:

$$G(\omega_n) = \frac{1}{\omega_n \left[\frac{\pi}{4\zeta_s} - 1 \right]} \left\{ \left(\frac{\omega_n \cdot Sv}{r_{s,p}} \right)^2 - \int_0^{\omega_n} G(\omega) d\omega \right\}^{1/2} \quad (14)$$

dimana :

$$\zeta_s = \frac{\zeta}{1 - e^{-2\zeta \cdot \omega_n \cdot t}} \quad (3.9a)$$

$$r_{s,p} = \left[2 \cdot \log \left\{ 2n \left[1 - \exp(-\delta_y(s) \sqrt{\pi \cdot \log 2n}) \right] \right\} \right]^{1/2} \quad (3.9b)$$

$$\delta_y(s) = \left(\frac{4\zeta \cdot t}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.9c)$$

$$n = \frac{-\omega_n \cdot t}{2\pi} \cdot \frac{1}{\log 0.368} \quad (3.9d)$$

dengan :

Sv = spektrum respons target

ζ = damping ratio

s = durasi

ω_n = frekuensi natural

Berdasarkan persamaan (12) dan (13), riwayat waktu dari gerakan gempa dapat ditentukan dengan rumus :

$$A_n = \sqrt{2 \int_0^{\omega_n} G(\omega_n) \cdot d\omega} \quad (15)$$

Power (kekuatan) dari persamaan getaran seperti pada pers. (12) mempunyai harga yang tidak bervariasi terhadap waktu. Untuk mensimulasikan sifat transien dari gerakan gempa, gerakan stationer, $x(t)$ biasanya dikalikan dengan sebuah kurva intensitas tertentu, seperti berikut ini:

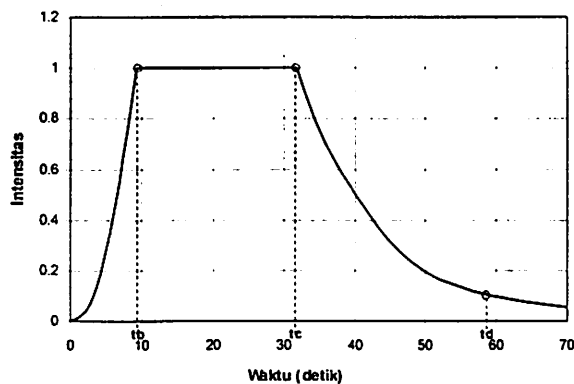
$$X(t) = a(t) \sum_n A_n \cdot \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (16)$$

Durasi dan kurva intensitas, dalam studi ini, ditentukan dengan menggunakan rumus Kuda (Newjec Inc., 1996), yaitu :

Tabel 2. Durasi dan Kurva Intensitas dari Kuda

Durasi : $t_d = 10^{0.31 M - 0.774}$		
M	t_b/t_d	T_c/t_d
6	0.16	0.54
7	0.12	0.50
8	0.08	0.46

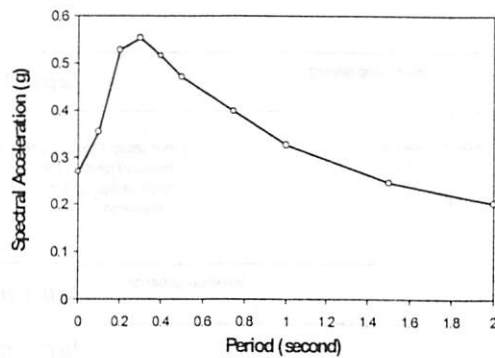
Analisis di dalam makalah ini, gempa yang diasumsikan dominan pengaruhnya untuk daerah ini adalah berasal dari Sesar Lasem W+E dengan $M=8,2$ sejarak 60 km (Newjec Inc., 1996). Berdasarkan rumus di atas, durasi gempa ditentukan selama 59,00 detik. Bentuk kurva intensitas dapat dilihat dalam Gambar 8 berikut ini.



Gambar 8. Kurva Intensitas berdasarkan Rumus Kuda untuk Gempa Lasem W+E

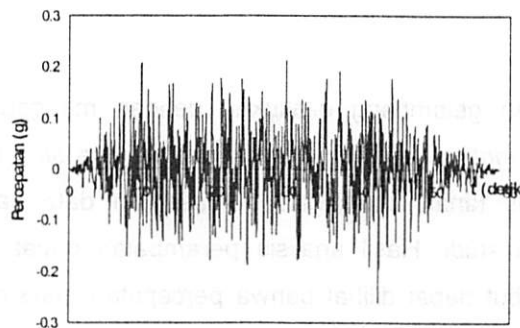
Pada tahap selanjutnya, spektrum respons ini dijadikan spektrum respons target yang ditentukan secara probabilistik melalui analisis risiko gempa. Seperti pada saat penentuan percepatan maksimum, penggunaan fungsi-atenuasi pada saat analisis juga dibedakan berdasarkan mekanisme gempa yang terjadi.

Hasil perhitungan spektrum respons target di batuan dasar untuk Semenanjung Muria dapat dilihat dalam Gambar 9.



Gambar 9. Spektrum respons Target di Batuan Dasar untuk Periode Ulang Gempa 10.000 tahun

Analisis simulasi gelombang gempa melalui pendekatan teori gerakan acak ini dilakukan dengan bantuan program SIMOQKE (Gasparini and Vanmarcke, 1976). Hasil analisis dapat dilihat dalam Gambar 10.

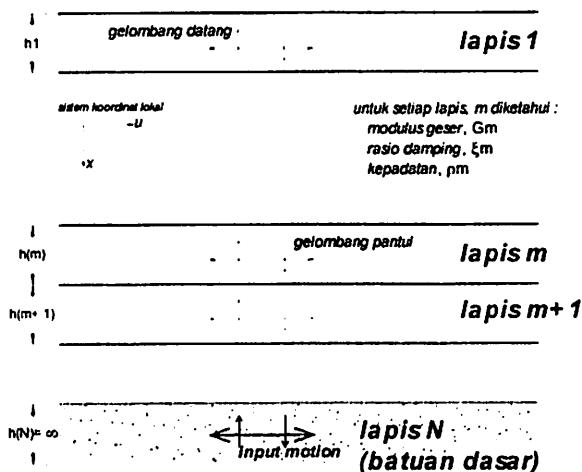


Gambar 10. Data Time Histories Percepatan Gempa Sintetis di Batuan Dasar

II. 6. Analisis Perambatan Gelombang Gempa dari Batuan Dasar ke Permukaan Tanah

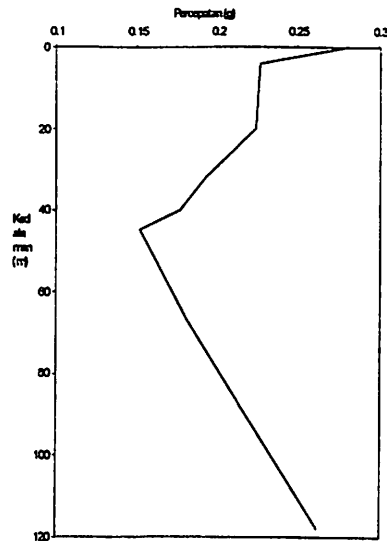
Perambatan gelombang geser dari batuan dasar ke permukaan dilakukan untuk memperoleh percepatan maksimum, faktor amplifikasi dan spektrum respons di permukaan tanah. Harga faktor amplifikasi sangat tergantung pada perilaku dinamis tanah setempat.

Perhitungan respon dinamis tanah dilakukan dengan analisis perambatan gelombang geser satu dimensi. Analisis ini didasarkan pada anggapan bahwa semua batas *material* (lapisan tanah) mempunyai arah horisontal dan respon tanah lebih disebabkan oleh adanya perambatan gelombang geser (*SH-wave*) secara vertikal dari batuan dasar ke permukaan. Teori ini dikemukakan pertama kali oleh *Kanai (1951)*, dan dikembangkan lebih lanjut oleh *Lysmer, Seed, dan Schnabel (1972)*. Sistem yang digunakan dalam analisis perambatan gelombang ini terlihat dalam Gambar 11.

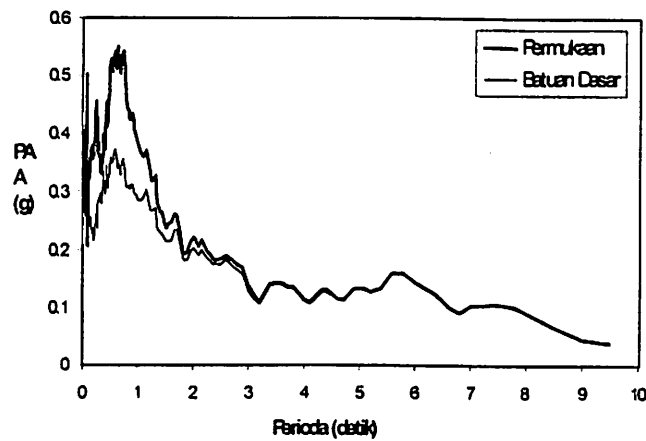


Gambar 11. Sistem yang Digunakan pada Analisis Respon Tanah Satu Dimensi (Schanabel. Et.,al, 1972)

Analisis perambatan gelombang dilakukan dengan menggunakan Program SHAKE91 (Idriss & Sun, 1992). Input *motion* yang digunakan adalah data *time histories* percepatan gempa sintetis. Parameter dinamis tanah ditentukan berdasarkan data dari penelitian yang pernah dilakukan di sekitar lokasi studi. Hasil analisis perambatan dapat dilihat dalam Gambar 12. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa percepatan maksimum mengalami amplifikasi menjadi 0.281 g (=281 gal) setelah dirambatkan melalui deposit tanah. Berdasarkan spektrum respons elastik yang dihasilkan (Gambar 13), terlihat bahwa amplifikasi yang cukup signifikan terjadi pada periode natural struktur antara 0.0-1.5 detik. Spektrum respons elastis di permukaan ini dapat digunakan sebagai input dalam penentuan beban gempa dalam perencanaan bangunan.



Gambar 12. Hasil Analisis Perambatan Gelombang Geser



Gambar 13. Perubahan Spektrum respons dari Batuan Dasar ke Permukaan untuk Semenanjung Muria

III. KESIMPULAN & SARAN

Makalah ini ditulis atas kerjasama antara P2EN-BATAN dengan Lab. Geoteknik – PAU ITB. Berdasarkan kondisi geologi dan kegempaan, sumber gempa di sekitar Semenanjung Muria terdiri dari : (i) Gempa-gempa *shallow crustal* terjadi pada ke dalaman 0-50 m di daerah utara dan timur

Semenanjung Muria dan di sekitar laut Jawa dan (ii) zona subduksi yang terletak pada jarak sekitar 400 km dari Muria bermula dari Samudra Hindia sekitar 250 km arah selatan Pulau Jawa dari kedalaman 50 km sampai kedalaman 150 km di bawah laut Jawa.

Pemilihan patahan kontrol yang digunakan dalam analisis adalah sesar Lasem E-W (baca: timur-barat) yang mempunyai rentangan yang signifikan, dan terbagi dalam dua segmen.

Sesar ini diakui keberadaannya berdasar atas beberapa penelitian. Tim dari Bidang Penerapan Sistem Energi – P2EN – BATAN masih merinci lebih detail mengenai letak sesar yang menjadi kontrol gempa bumi, dan bagaimana risikonya dalam cakupan waktu yang ditentukan terhadap semenanjung Muria (S-1 dan S-2).

Pada kegiatan lain, analisis telah dilakukan secara komprehensif dengan metode elemen hingga (GEO-SLOPE/W, FLUSH+) dengan menggunakan parameter reaktor tipe ABWR – BR (*General Electric*). Selanjutnya hasil tingkat keamanan telah melampaui angka keamanan minimum dari ketentuan IAEA. Meskipun demikian langkah-langkah pendukung kriteria keamanan dan monitoring tetap dilakukan oleh P2EN-BATAN, bekerjasama dengan pihak terkait (BMG, Direktorat Survey Vulkanologi, Bandung, dll). Dalam waktu mendatang diharapkan makalah tersebut dapat dipresentasikan.

Pada tingkatan gempa rencana maksimum, analisis risiko gempa secara probabilistik menghasilkan PGA di batuan dasar sebesar 262 gal untuk periode ulang gempa 10.000 tahun. Gempa dengan periode ulang 10.000 tahun ini patut diperhitungkan sebagai konstanta *Operating Basis Earthquake* (OBE IS-1 Earthquake, *Safety Guides* IAEA) dalam perencanaan bangunan-bangunan khusus yang diharuskan mempunyai tingkat keamanan yang khusus, seperti fasilitas nuklir. Sehingga dalam langkah selanjutnya dapat ditetapkan angka masa layan bangunan (n).

Pada pembuatan *time histories* percepatan gempa sintetis, digunakan kurva intensitas dari Kuda dan spektrum respons target yang dibuat secara probabilistik. Motion yang dihasilkan ini kemudian dirambatkan ke permukaan melalui deposit tanah. Pada analisis ini, diketahui bahwa percepatan gempa mengalami amplifikasi sebesar 1.1 kali. Untuk periode ulang 10.000 tahun, PGA di permukaan menjadi 281 gal. Berdasarkan spektrum respons elastik di permukaan juga ditunjukkan bahwa tanah memberikan respon yang mengakibatkan amplifikasi yang cukup signifikan pada periode natural struktur antara 0-1.5 detik

Semenanjung Muria merupakan lokasi yang berpotensi untuk mewujudkan rencana pembangunan fasilitas energi di masa datang. Meskipun demikian, langkah-langkah pendukung yang mencakup keamanan dan monitoring kiranya perlu diadakan secara kontinu mengikuti proses alam.

DAFTAR PUSTAKA

1. BECA CARTER HOLLINGS & FERNER (1977), Earthquake Risk in Indonesia Location of Seismological and Geological Data, Indonesia Earthquake Study, Vol.2.
2. BECA CARTER HOLLINGS & FERNER (1979), Seismic Zone for Building Construction in Indonesia, Indonesia Earthquake Study, Vol.3.
3. BOORE, D.M., JOYNER, W.B., and FUMAL, T.E., Equation for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North America Earthquakes, A Summary of Recent Work, Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1, pp. 128-153, January/February 1997.
4. CORNELL, C.A., Engineering Seismic Risk Analysis, Seismic Soc. America Bull, v.58, no. 5, p. 1503-1606, 1968.
5. CORNELL, C.A., and MERZ, H.A., Seismic Risk Analysis of Boston, Journal Structure Div., Proceedings, Am. Soc. Civil Engineers, v. 101, no. ST10, p. 2027-2043, 1974.
6. CROUSE, C.B., Ground-Motion Attenuation Equation for Earthquake on the Cascadia Subduction Zone, Earthquake Spectra, Vol. 7 No2, 1991.
7. DACREA, Seismic Design Criteria Jakarta Tower, Engineering Report, 1996.
8. DONOVAN, N.C., A Statistical Evaluation of Strong Motion data Including The February 9, 1971, San Fernando Earthquake, World Conf. Earthquake Eng., 5th, Rome 1973, Proc., v. 1, p. 1252-1261, 1974.
9. ESTEVA, L., Seismic Risk and Seismic Design Decision, in Hansen, R.J., ed., Seismic Design for Nuclear Power Plant: Cambridge, M.I.T Press, p. 142-182, 1970.
10. FIRMANSJAH, J., Seismic Design Criteria for Menara Jakarta Project, 1997.
11. FIRMANSJAH, J., Development of Seismic Hazard Map For Indonesia, Seminar HAKI, September 1999.
12. GASPARINI, D.A., dan VANMARCKE, E.H., SIMQKE (User's Manual and Documentation), Dept. of Civil Engineering of Massachusetts Institute of Technology, 1976.
13. GUTTENBERG, B., dan RICHTER, C.F., Earthquake Magnitude Intensity, Energy, and Acceleration, Second Paper, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.46, No.2, 1956.
14. HOU, S., Earthquake Simulation Models and Their Applications, MIT Depart. of Civil Eng. Research Report R68-17, May 1968.
15. IDRIS, I.M., Procedure for Selecting Earthquake Ground Motions at Rock Sites, A Report to National Institut of Standard and Technology United States, Department of Commerce Gaithersburg, Maryland, 1993.

16. IDRIS I.M., dan SUN J. I., SHAKE 91 (User's Manual) A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits, Modification of Original SHAKE published in December 1972 by Schnabel, Lysmer & Seed, sponsored by Structures Division Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, Maryland and Center for Geotechnical Modeling Dept. of Civil and Environmental Eng., University of California, Davis, California, November 1992.
17. IRSYAM, M., dan HANDOYO, A., Peran geologi dalam Mitigasi Gempa Tektonik Terhadap Kerusakan bangunan, Seminar Sehari Peran Geologi Pertambangan Dalam Menunjang RTRW DKI Jakarta Menuju Kota Jasa Pada Era Globalisasi, Pemerintah Daerah Khusus Ibu Kota Jakarta, September 1997.
18. IRSYAM, M., dan ASDANI, Studi Keterkaitan Struktur Geologi Regional Terhadap Rencana Subway dan Reklamasi di Wilayah DKI Jakarta, LPM ITB-Dinas Pertambangan DKI Jakarta, Bandung, 1998.
19. MCGUIRE, R.K., Seismic Structural Response Risk Analysis, Incorporating Peak Response Regression on Earthquake Magnitude and Distance, MIT, Dept. Civil Eng., Research Rept. R74-51, 371 p, 1974.
20. MCGUIRE, R.K, FORTRAN Computer Program for Seismic Risk Analysis US Geological Survey Open File Report, 67-76, 1976.
21. NEWJEC INC., Topical Report on Seismology (Step3) for Muria, Engineering Report, November 1996.
22. YOUNGS, R.R., CHIOU, S.J., SILVA, W.J., HUMPHREY, J.R., Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquake, Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1, pp. 58-74, 1997.
23. SOUTHEAST ASIA ASSOCIATION OF SEISMOLOGY AND EARTHQUAKE ENGINEERING, Series on Seismology; Indonesia, Vol. 5, pp. 1583 - 1606, 1968.