

Studi Keandalan Selubung Respons Spektrum Kelas Tanah Lunak Zona 5 untuk Daerah Meukek, NAD

Delfebriyadi

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Andalas, Kampus Unand Limau-Manis Padang, Sumatera Barat.

E-mail: delfebri@ft.unand.ac.id

Abstrak

Indonesia merupakan negara dengan aktivitas seismik yang tinggi sehingga perencanaan bangunan harus memperhitungkan aspek-aspek kegempaan. Suatu teknik analisis resiko gempa dapat dilakukan berdasarkan kriteria desain yang disyaratkan SNI 03-1726-2002, yaitu untuk umur bangunan 50 tahun dan kemungkinan terlampaui 10%. Untuk kebutuhan itu, dilakukan studi analisis site-specific response spectra pada daerah Meukek yang ditujukan untuk mempelajari keandalan selubung respons spektrum percepatan desain untuk kelas tanah lunak zona wilayah gempa 5 dalam SNI 03-1726-2002 terhadap kejadian gempa besar yang terjadi di wilayah Aceh dan Nias beberapa waktu lalu. Karena belum adanya data riwayat waktu percepatan gempa terekam di batuan dasar yang representatif untuk wilayah Meukek, maka dilakukan perhitungan hazard kegempaan secara deterministik, serta pembuatan data riwayat waktu sintetik berdasarkan metoda stokastik dan teknik penskalaan gelombang terhadap suatu skenario gempa rencana menggunakan program SMSIM. Perambatan gelombang gempa dari batuan dasar ke permukaan tanah dianalisis berdasarkan teori perambatan gelombang geser satu dimensi dengan menggunakan program NERA dengan input stratifikasi tanah dan parameter kecepatan gelombang geser dari korelasi empiris terhadap data hasil pemboran dan uji N-SPT di lokasi kajian. Hasil akhir adalah riwayat waktu percepatan sintetik pada lapisan batuan dasar, serta respons spektrum percepatan desain di permukaan tanah lokasi kajian berdasarkan skenario gempa yang direncanakan.

Kata-kata kunci: Spektral percepatan, riwayat waktu sintetik, respons spektrum, perambatan gelombang gempa.

Abstract

Indonesia has been well known as one of the most seismically active countries in the world. Therefore, the building design in Indonesia should consider these seismic activities. Seismic hazard analysis for any site may develop based on SNI 03-1726-2002, that implements spectral hazard for 10 % probability of exceedance in a building life time period of 50 years. In this study, a site specific response spectra was conducted on Meukek site to evaluate the performance of the response spectra based on criteria on SNI 03-1726-2002 comparing the response spectra conducted by the big earthquake event off the west coast of northern Sumatra that acted recently. There is no available strong motion data for Meukek site that is representative at this moment, therefore the Deterministic Seismic Hazard Analysis is performed, and the synthetic time histories are then simulated based on a stochastic method using SMSIM program. The analysis of shear wave propagation is performed using NERA which is based on one dimensional wave propagation theorem. Dynamic soil properties are obtained from the correlation with N-SPT value from soil investigation report covering Meukek site. The final result of this research are the synthetic time histories on the bedrock, and the design response spectrum on the site ground surface based on design earthquake scenario.

Keywords: Spectral acceleration, synthetic time histories, response spectrum, wave propagation.

1. Pendahuluan

Beberapa waktu yang lalu kita dikejutkan dengan gempa bumi yang melanda Aceh dan Sumatera Utara yang mempunyai kekuatan sangat menakjubkan, mengakibatkan porak-porandanya bangunan-bangunan serta menimbulkan gelombang tsunami

yang datang beberapa saat kemudian, yang menyebabkan ratusan ribu manusia meninggal seketika. Gempa Sumatra-Andaman ($M_w=9,0$) terjadi pada tanggal 26 Desember 2004, berjarak 259 km dari kota Banda Aceh. Epicenter gempa tersebut berada $3,316^\circ$ LU dan $95,854^\circ$ BT pada kedalaman 30 km di bawah dasar laut. Setahun setelah kejadian itu,

28 Maret 2005, terulang lagi gempa dengan magnitude (M_w) 8,7 yang berpusat di sekitar kepulauan Nias, pada koordinat $2,076^\circ$ LU dan $97,013^\circ$ BT dengan kedalaman 30 km di bawah dasar laut. Guncangan tanah juga menyebabkan kerusakan parah pada infrastruktur seperti bangunan, jalan dan jembatan.

Sumber gempa yang terjadi tersebut berada pada daerah subduksi pertemuan lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia. Pertanyaan yang muncul setelah kejadian-kejadian gempa tersebut adalah berhubungan dengan distribusi sumber gempa pada suatu wilayah serta seberapa besar dampak kerusakan terhadap bangunan yang diakibatkan oleh guncangan tanah itu. Secara umum, properti dari guncangan tanah akan dipelajari dalam studi ini melalui perbandingan selubung respons spektrum desain berdasarkan kriteria SNI 03-1726-2002 dengan selubung respons spektrum desain untuk *site* ditinjau berdasarkan kejadian gempa-gempa besar di bawah.

2. Parameter Seismic Hazard

Dalam analisis resiko gempa yang dilakukan, digunakan fungsi atenuasi yang diperoleh dari wilayah lain yang memiliki kemiripan tektonik dan geologi dengan wilayah Indonesia. Fungsi atenuasi yang dipakai pada studi ini adalah persamaan yang dikemukakan oleh Youngs dkk. (1997) untuk mekanisme gempa subduksi. Model gempa atenuasi untuk zona subduksi pada umumnya dapat dibagi dalam dua kategori, yaitu gempa *interface* dan gempa *interslab*. Gempa *interface* terjadi pada zona dengan sudut tujaman rendah pada tumbukan dua lempeng

pada zona subduksi. Sedangkan gempa *interslab* terjadi pada kedalaman lebih dari 50 km. Gempa *interslab* pada umumnya berupa gempa patahan normal bersudut besar.

Berdasarkan fungsi atenuasi yang dikemukakan oleh Youngs dkk. (1997), maka untuk batuan:

$$\ln(y) = 0,2418 + 1,414M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1,7818e^{0,554M}) + 0,00607H + 0,3846Z_T \quad (1)$$

dengan deviasi standar = $C_4 + C_5M$

Dimana :

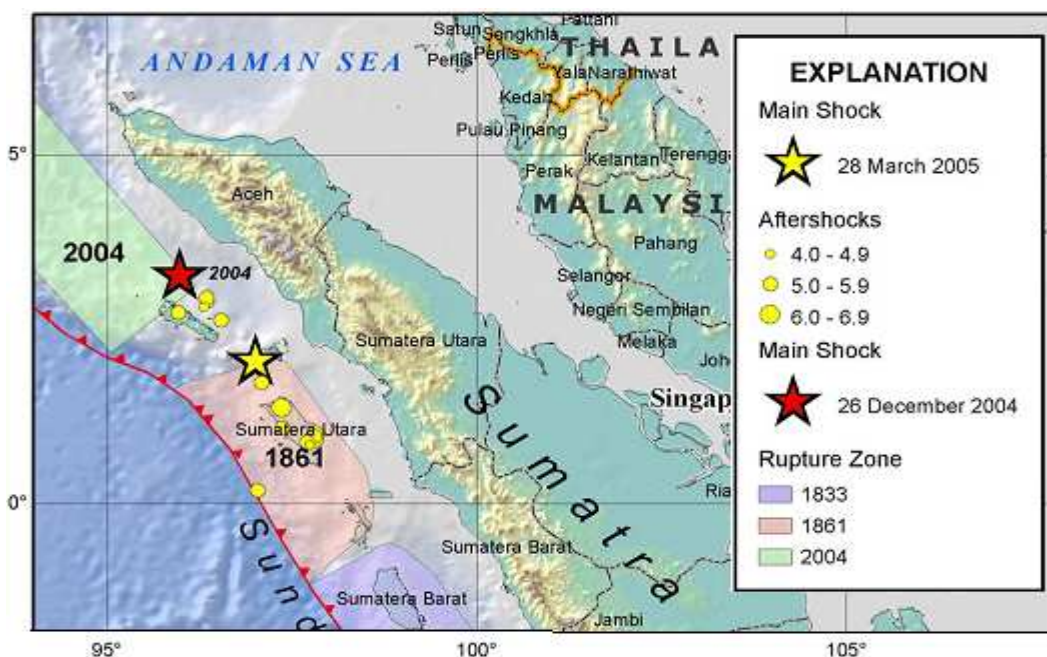
- y = spectral acceleration (g)
- M = momen magnitude
- r_{rup} = jarak terdekat terhadap *rupture* (km)
- H = kedalaman (km)
- Z_T = tipe sumber, bernilai 0 untuk *interface*

Koefisien-koefisien pada fungsi ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Koefisien fungsi atenuasi (Youngs, dkk.,1997)

Period(s)	C_1	C_2	C_3	C_4^*	C_5^*
0,0	0,000	0,000	-2,552	1,45	-0,1
0,1	1,188	-0,0011	-2,655	1,45	-0,1
0,2	0,722	-0,0027	-2,528	1,45	-0,1
0,3	0,246	-0,0036	-2,454	1,45	-0,1
0,4	-0,115	-0,0043	-2,401	1,45	-0,1
0,5	-0,400	-0,0048	-2,360	1,45	-0,1
1,0	-1,736	-0,0064	-2,234	1,45	-0,1
1,5	-2,634	-0,0073	-2,160	1,50	-0,1
2,0	-3,328	-0,0080	-2,107	1,55	-0,1

*standard deviasi untuk magnituda lebih besar dari M8 bernilai sama dengan nilai M7



Gambar 1. Kejadian Gempa Aceh (2004) dan Gempa Nias (2005) berdasarkan data NEIC USGS

3. Analisis Resiko Gempa

Daerah Meukek secara geografis berada pada koordinat 3,35° LU dan 97,11° BT terletak di Propinsi Nangroe Aceh Darussalam. Dalam kajiannya tentang resiko gempa, perlu diidentifikasi secara seismologi adanya beberapa zona sumber gempa aktif yang memiliki potensi dan kontribusi seismik signifikan terhadap wilayah tersebut seperti zona subduksi Sumatera dan zona patahan Semangko.

Untuk menghitung resiko gempa berdasarkan suatu batas intensitas gempa tertentu pada suatu daerah kajian dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu secara deterministik (*Deterministic Seismic Hazard Analysis/DSHA*) dan probabilistik (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis/PSHA*). Pada makalah ini, percepatan gempa di batuan dasar untuk site ditinjau diperoleh dari hasil analisis dengan metode Deterministic Seismic Hazard Analysis.

Metode Deterministik umum digunakan pada awal perkembangan rekayasa gempa. Metode ini merupakan cara analisis yang hanya mengambil satu kejadian gempa maksimum yang kredibel sebagai dasar analisis, yang terdiri dari 4 langkah (**Gambar 2**), yaitu:

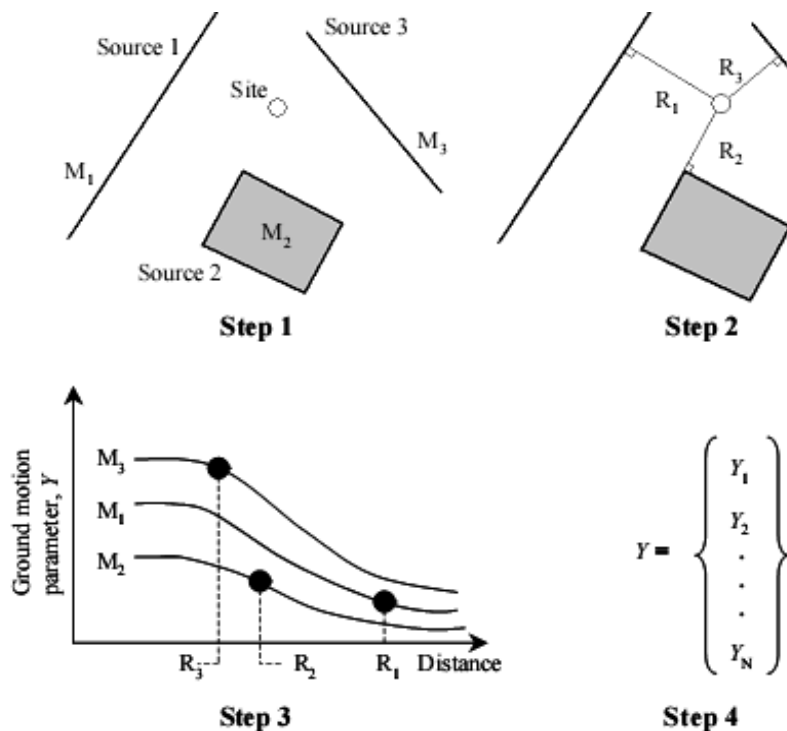
1. Identifikasi dan karakterisasi semua sumber gempa yang berpotensi menghasilkan *ground motion* yang signifikan.

2. Penentuan parameter jarak sumber gempa ke lokasi kajian untuk setiap sumber gempa.
3. Seleksi gempa yang diperkirakan akan menghasilkan guncangan terbesar dengan cara membandingkan guncangan yang dihasilkan gempa pada jarak dan lokasi tertentu atau dikenal dengan istilah *controlling earthquake*.
4. Mendefinisikan karakter dari resiko gempa pada wilayah kajian, seperti percepatan puncak, kecepatan puncak dan ordinat respons spektrum.

Suatu evaluasi deterministik dilakukan untuk memperoleh spektra dari masing-masing sumber gempa yang mempunyai potensi signifikan terhadap lokasi ditinjau. Fungsi atenuasi digunakan untuk memperkirakan ordinat spektra (**Gambar 3**) untuk tujuan di atas. Hasil analisis dengan metode DSHA memperlihatkan kedua kejadian gempa yang telah disebutkan sebelumnya yang memberikan kontribusi terbesar yang berada pada kisaran jarak dan magnituda tertentu (**Tabel 2**). Informasi jarak dan magnituda tersebut merupakan bagian informasi pemilihan kriteria *ground motion* dengan karakteristik yang mendekati kondisi yang diinginkan.

Tabel 2. Resiko gempa terhadap daerah Meukek

Kejadian	M _w	R (km)	H (km)	PGA (g)
Gempa Aceh, 2004	9.0	125	30	0.126
Gempa Nias, 2005	8.7	128	30	0.107



Gambar 2. Tahapan analisa resiko gempa dengan metoda DSHA (Reiter, 1990)

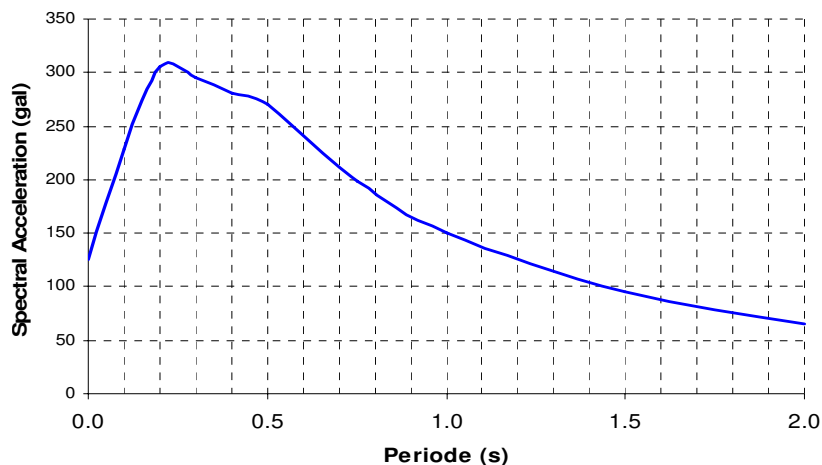
Hasil perhitungan pada Tabel 2 memperlihatkan kejadian gempa Aceh yang memberikan nilai *peak ground acceleration* yang lebih besar, sehingga akan dipilih sebagai *controlling event*.

4. Pembuatan Riwayat Waktu Sintetik

Karena sulit didapatkannya riwayat waktu percepatan original untuk kejadian gempa dengan besar magnitude dan jarak yang sebanding dengan kejadian gempa Aceh (2004), maka data riwayat waktu percepatan gempa dicari dengan membuat data digitasi sintetik dengan melakukan *simulasi* riwayat waktu sintetik yang didapatkan berdasarkan model numerik dari suatu proses *fault rupture* dengan penjalaran gelombang gempa untuk suatu jarak tertentu. Program SMSIM (Boore, 2000) digunakan dalam pembuatan riwayat waktu sintetik tersebut dengan memakai *input data* berupa parameter yang digunakan oleh Atkinson dan Silva (2000).

Simulasi dalam domain waktu dapat dibuat dengan langkah-langkah seperti; membangkitkan *white noise* dengan bentang waktu sepanjang durasi dari riwayat waktu yang diperkirakan (Gambar 4a). *White noise* kemudian dibentuk dengan suatu pola selubung tertentu (Gambar 4b). *White noise* yang telah dibentuk tadi kemudian ditransformasikan ke dalam domain frekuensi (Gambar 4c) dan spektrum tersebut dinormalisir oleh akar kuadrat dari kuadrat rata-rata (*the square-root of the mean square*) nilai amplitudo spektrum (Gambar 4d). Spektrum yang dinormalisir tersebut lalu diskalakan dengan suatu spektrum gerakan tanah target (Gambar 4e). Hasil akhir adalah riwayat waktu yang didapatkan kembali dari transformasi spektrum yang telah diskalakan tadi ke dalam domain waktu (Gambar 4f).

Gambar 5 merupakan hasil keluaran dari program SMSIM yang berupa riwayat waktu sintetik berdasarkan simulasi kejadian gempa dengan magnitude M9,0 dan jarak episenter 125 km.



Gambar 3. Deterministik spektra untuk M=9 dan R = 125 km berdasarkan fungsi atenuasi Youngs dkk.

5. Analisis Respons Dinamik Tanah

5.1 Perambatan gelombang geser 1-dimensi

Perambatan vertikal gelombang geser adalah perambatan gelombang yang hanya akan menyebabkan perpindahan dalam arah horizontal. Profil tanah diidealisasikan sebagai sistem yang homogen dan lapisan *visco-elastis* dengan lebar tak terhingga. Respons dari sistem ini dihitung melalui perambatan gelombang geser dari batuan dasar ke lapisan permukaan.

Penyederhanaan model yaitu dimana profil tanah diidealisasikan sebagai sistem *lumped mass* yang terdiskritisasi yang diperlihatkan pada Gambar 6.

Perambatan gelombang dapat diformulasikan ke dalam bentuk:

$$[M].\{\ddot{u}\} + [C].\{\dot{u}\} + [K].\{u\} = -[M].\{I\}.\ddot{u}_g \quad (2)$$

dimana;

[M] = matriks massa; [C] = matriks redaman *viscous*;

[K] = matriks kekakuan; $\{\ddot{u}\}$ = vektor percepatan

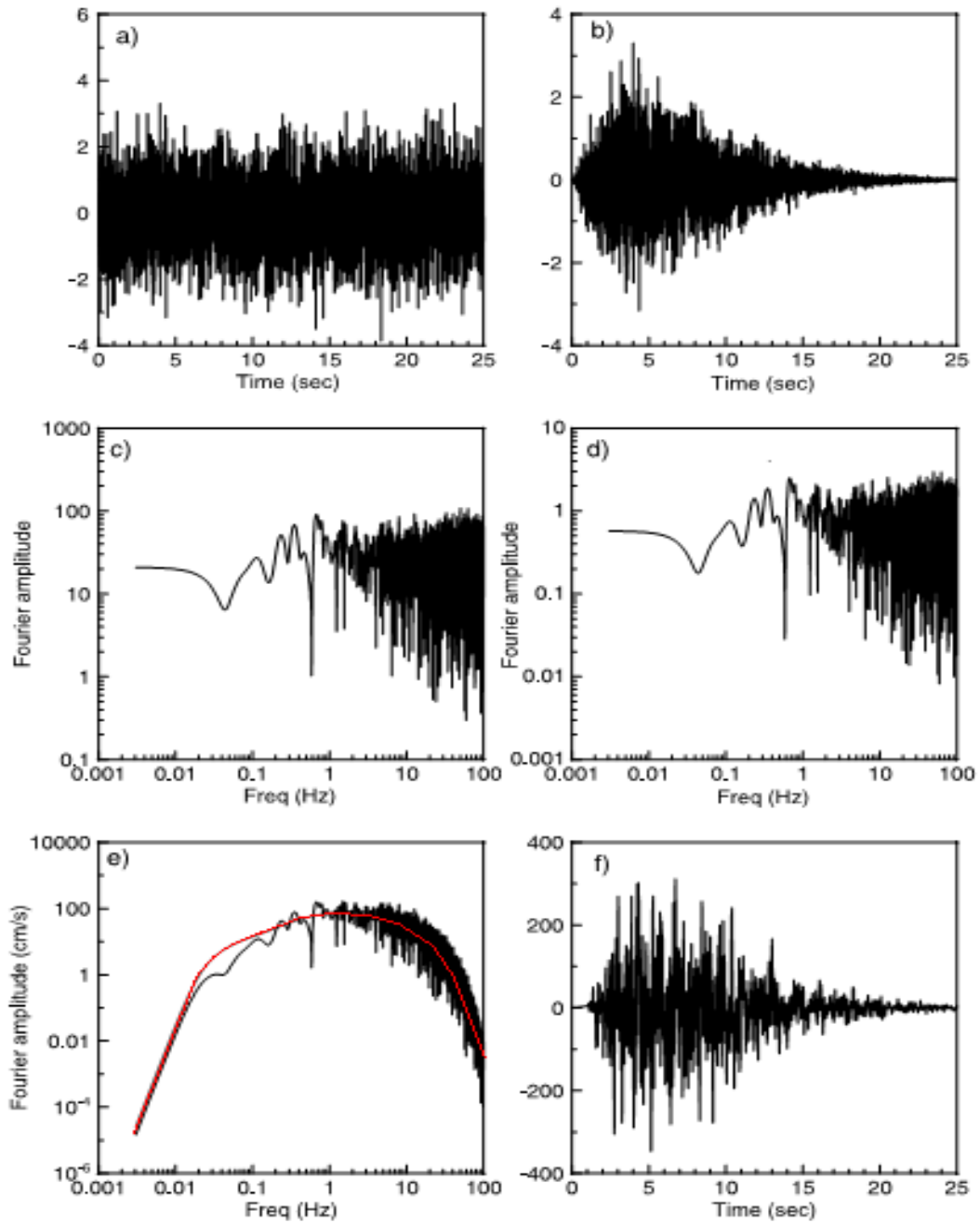
relatif nodal; $\{\dot{u}\}$ = vektor kecepatan relatif nodal;

dan $\{u\}$ = vektor perpindahan relatif nodal. \ddot{u}_g adalah

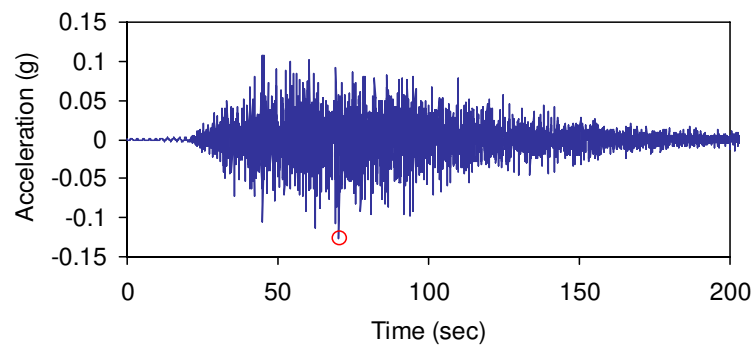
percepatan yang bekerja pada dasar *soil column* dan

$\{I\}$ adalah vektor satuan.

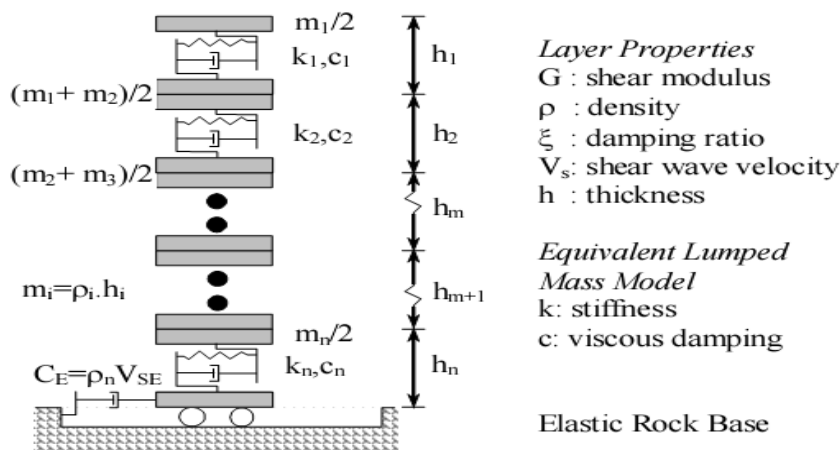
Dengan menggunakan prinsip kesetimbangan gaya dan kompatibilitas perpindahan, dan hubungan regangan-perpindahan serta hubungan tegangan-regangan, maka persamaan gelombang satu dimensi dapat dipecahkan. Bentuk dari persamaan gelombang satu dimensi merupakan persamaan diferensial parsial:



Gambar 4. Langkah-langkah prosedur pembuatan riwayat waktu gerakan tanah berdasar- metoda *stochastic* (Boore, 2003)



Gambar 5. Riwayat waktu sintetik di lapisan batuan dasar daerah Meukek untuk mekanisme sumber gempa megathrust



Gambar 6. Pemodelan perambatan gelombang 1-Dimensi dengan solusi domain - waktu (Hashash dan Park, 2004)

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \cdot \partial t} \quad (3)$$

dimana:

- u = perpindahan
- τ = tegangan geser
- G = modulus geser
- η = viskositas
- ρ = rapat massa

Persamaan (2) dan persamaan (3) dapat diselesaikan secara numerik dengan suatu proses iterasi *time step* yang bernilai kecil hingga mencakup seluruh durasi *input data* riwayat waktu guncangan tanah. Penyelesaian ini ditujukan menghitung distribusi nilai tegangan, regangan pada tiap kedalaman lapisan tanah yang diberikan.

5.2 Parameter dinamik tanah

Sifat dan penyebaran kerusakan akibat gempa terutama dipengaruhi oleh respons tanah terhadap beban siklik. Respons tanah ini ditentukan oleh parameter tanah, dalam hal ini adalah parameter dinamik tanah. Parameter dinamik yang digunakan dalam analisis respons dinamik tanah adalah modulus geser maksimum (G_{max}), kecepatan rambat gelombang geser (V_s) dan redaman (ξ). Nilai modulus geser dan rasio redaman bergantung pada beberapa faktor, seperti jenis tanah, tekanan keliling, tingkat regangan dinamik, derajat kejenuhan, frekuensi, magnituda tegangan dinamik, dan regangan dinamik.

Parameter dinamik tanah G_{max} ataupun V_s biasanya dikorelasikan dengan kuat geser tanah yang diperoleh dari uji laboratorium ataupun besaran-besaran yang diperoleh dari uji lapangan seperti nilai N-SPT dan q_c sondir. Dalam studi ini, korelasi yang digunakan berasal dari Imai dan Tonouchi (1982).

Untuk tanah berpasir (tanah non-koheusif);

$$V_s = 350 (N)_{60}^{0.314} \text{ (fps)} \quad (4)$$

$$G_{max} = 325 (N)_{60}^{0.68} \text{ (ksf)} \quad (5)$$

Untuk tanah lempung (tanah koheusif);

$$V_s = 96.9 (N)^{0.314} \text{ (m/s)} \quad (6)$$

$$G_{max} = 4070 (N)^{0.68} \text{ (kpa)} \quad (7)$$

5.3 Kondisi tanah lokal

Kondisi tanah lokal diklasifikasikan berdasarkan standard dari SNI 03-1726-2002, UBC 1997 dan NEHRP 1997. Klasifikasi ini dilakukan dengan menggunakan parameter kecepatan gelombang geser rata-rata (V_s), N_{-SPT} atau kuat geser niralir (S_u) pada tanah hingga kedalaman 30 m lapisan teratas di lokasi yang ditinjau.

Data tanah yang dipergunakan dalam analisis mengacu pada hasil pemboran dan uji SPT di lokasi ditinjau (Gambar 7). Berdasarkan kisaran nilai N_{spt} terendah, maka nilai rata-rata kecepatan gelombang geser 30 meter pertama lapisan tanah lokasi rencana (V_{s30}) adalah 145 m/detik, $N_{-SPT-30} = 4$ yang diklasifikasikan sebagai kelas tanah lunak menurut SNI 03-1726-2002 dan diklasifikasikan sebagai kelas *soft soil profile* (S_e) menurut UBC 1997 dan NEHRP 1997 (Gambar 8).

Analisis perambatan gelombang geser dilakukan menggunakan program NERA (Bardet dan Tobita, 2001) dengan menggunakan harga G_{max} dan V_s dari korelasi N-SPT. Harga G_{max} dan V_s diperoleh dengan menggunakan korelasi dari Imai dan Tonouchi (1982). Karena data tanah yang ada hanya sampai kedalaman 30 m, maka untuk kedalaman lebih besar dari 30 m, harga V_s diperoleh dengan cara interpolasi linier hingga ke batuan dasar. Kedalaman batuan dasar diasumsikan sedalam 50 m. Kecepatan gelombang geser di batuan dasar (*site class* S_B) diambil sebesar 760 m/detik. Percepatan maksimum

di permukaan tanah berdasarkan hasil analisis perambatan gelombang dengan data gempa sintetik berkisar 0.3g.

6. Respons Spektrum Permukaan Tanah

6.1 Respons spektrum desain SNI 03-1726-2002

SNI 03-1726-2002 mensyaratkan penggunaan respons spektrum desain permukaan tanah untuk umur bangunan 50 tahun dan probabilitas terlampaui 10%, sesuai dengan respons spektrum untuk masing-masing jenis tanah dan zona wilayah gempa (Gambar 9 dan 10).

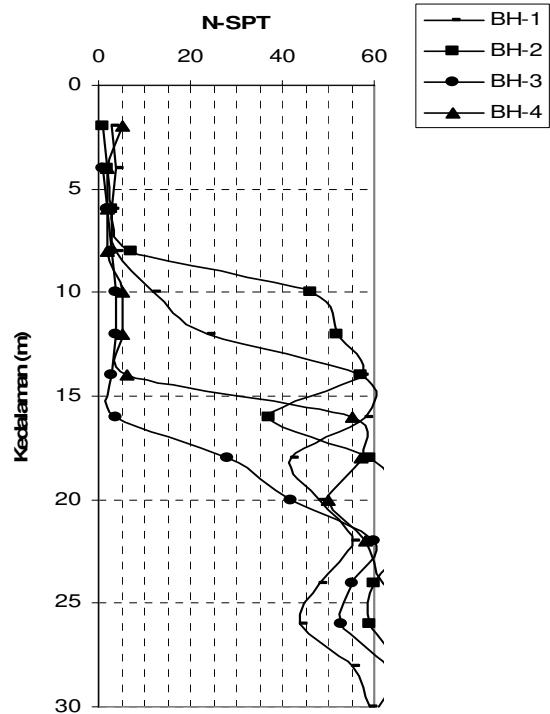
6.2 Respons spektra berdasarkan kode standard

Respons spektrum permukaan tanah desain kelas tanah lunak untuk kejadian Gempa Aceh dapat diperkirakan melalui perhitungan dengan faktor amplifikasi tanah menggunakan peraturan lain yang berlaku. Pada Gambar 11 diperlihatkan perbandingan antara perkiraan respons spektrum permukaan tanah kelas tanah lunak dari kejadian Gempa Aceh (menurut UBC 1997 dan NEHRP 1997) dengan respons spektrum permukaan tanah desain kelas tanah lunak-zona gempa 5 untuk umur bangunan 50 tahun dan probabilitas terlampaui 10% (SNI 03-1726-2002).

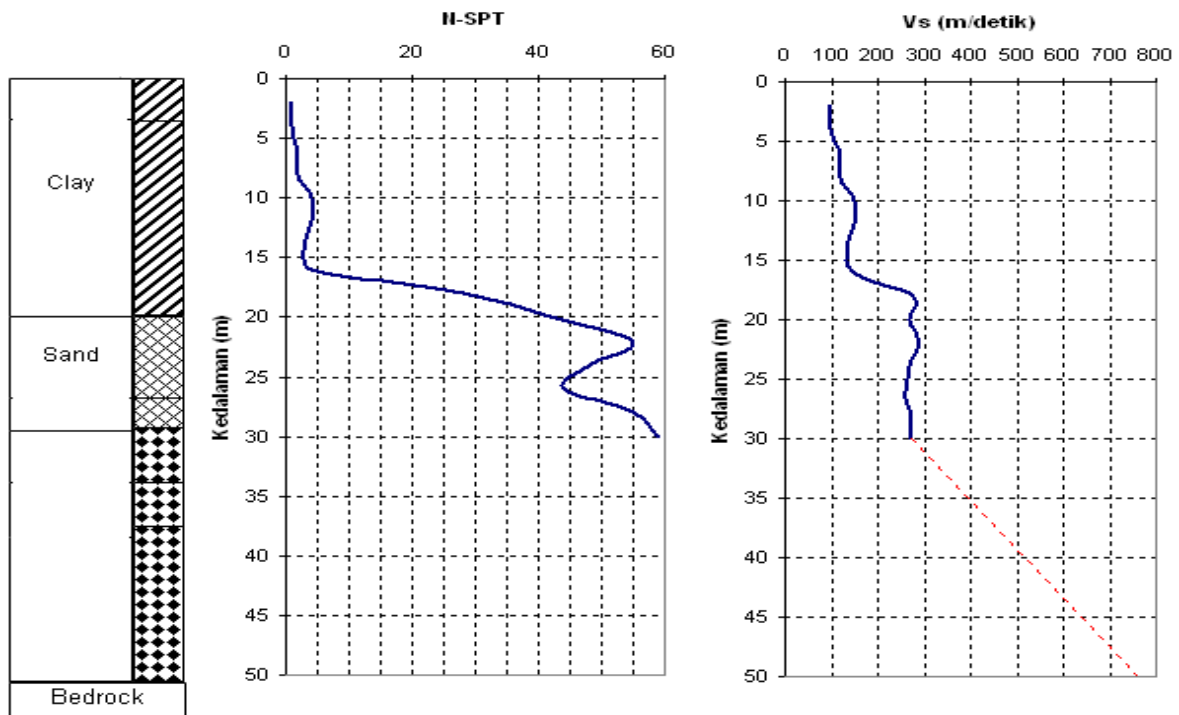
6.3 Respons spektrum perambatan gelombang

Analisis perambatan gelombang geser dari batuan dasar ke permukaan tanah menggunakan program

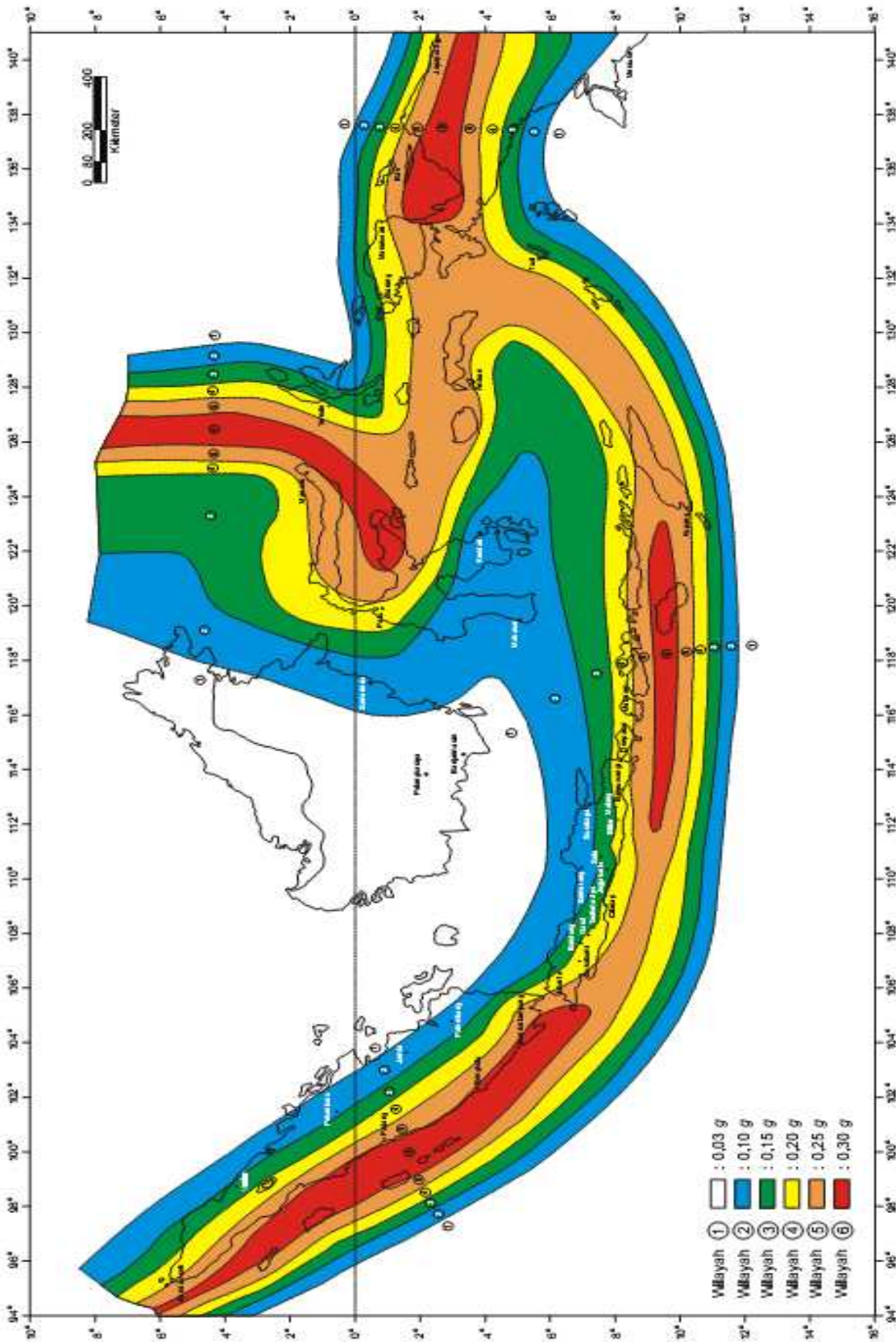
NERA (Bardet dan Tobita, 2001) dilakukan dengan tujuan mendapatkan parameter amplifikasi tanah pada tanah lokal dan respons spektrum di permukaan tanah lokasi kajian. Gambar 12, 13 dan 14 berturut-turut menggambarkan hasil analisis respons dinamik tanah terhadap guncangan tanah yang dikerjakan pada lapisan batuan dasar.



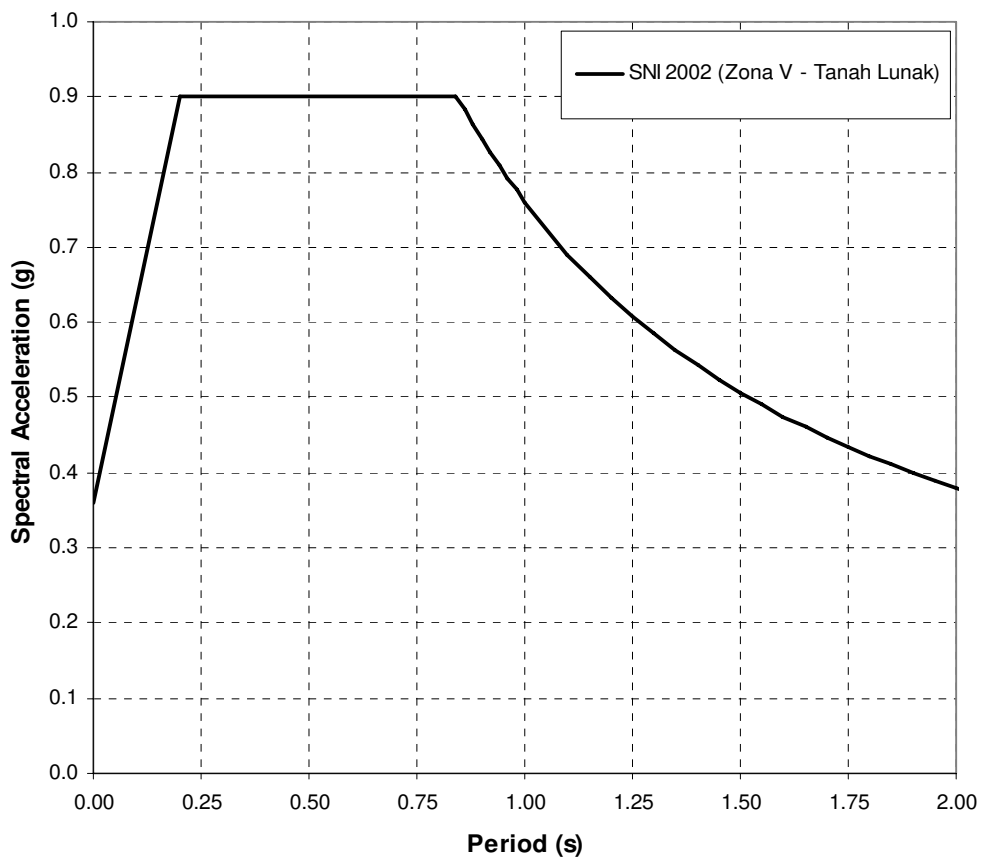
Gambar 7. Hasil penyelidikan tanah di lokasi ditinjau N-SPT yang terendah



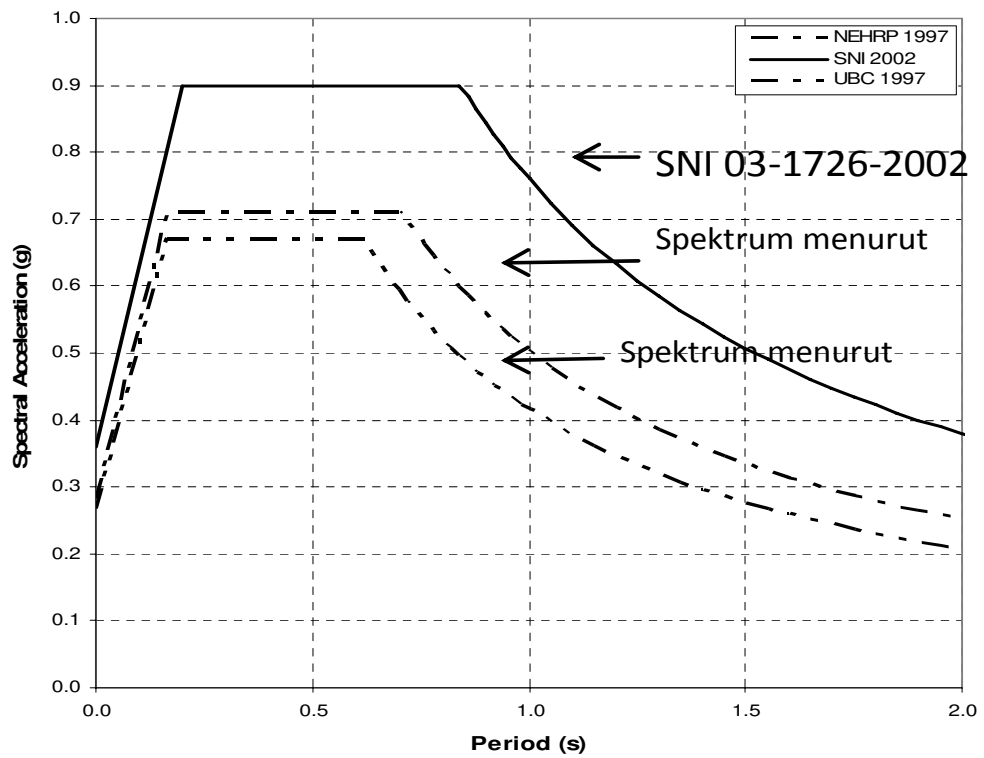
Gambar 8. Properties dinamik tanah untuk nilai



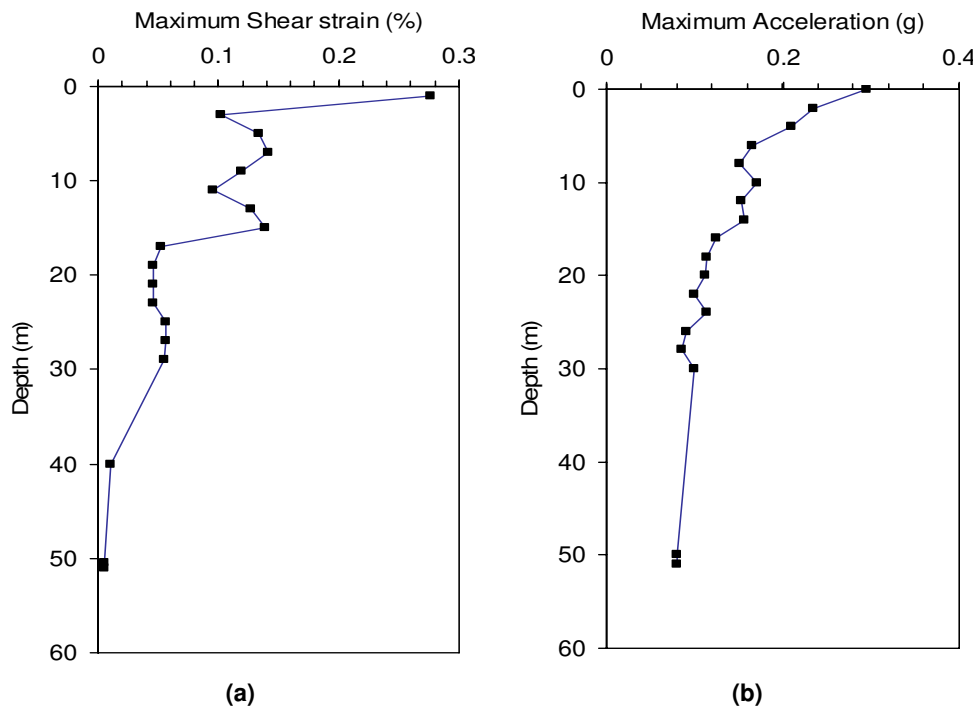
Gambar 9. Zona Gempa Indonesia dengan percepatan puncak batuan dasar untuk periode ulang 500 tahun (SNI 03-1726-2002)



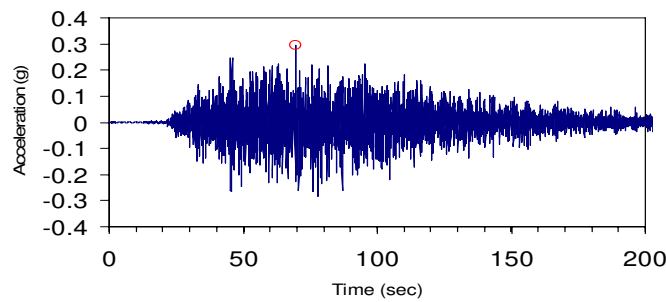
Gambar 10. Respons spektra permukaan tanah desain untuk tanah lunak, zona 5 (SNI 03-1726-2002)



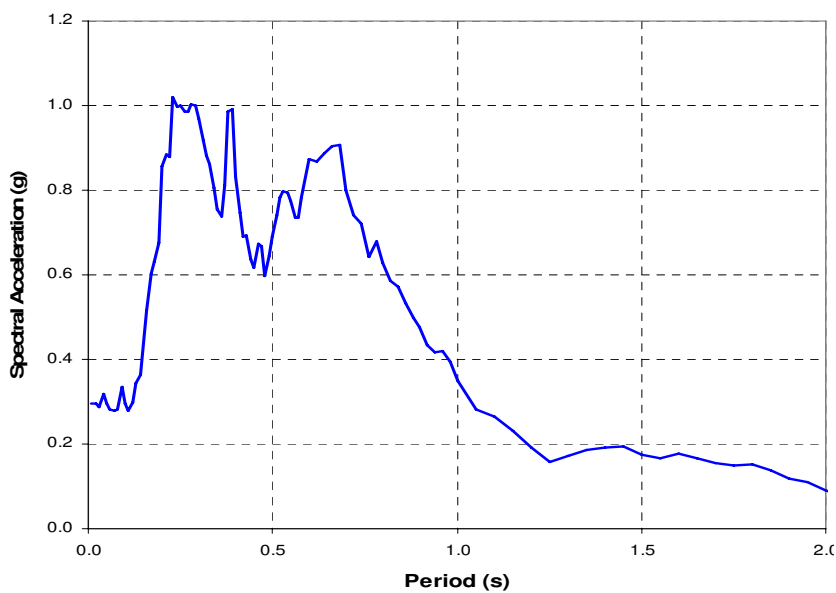
Gambar 11. Perbandingan respons spektrum permukaan tanah desain kelas *soft soil profile* berdasar kejadian Gempa Aceh (2004)



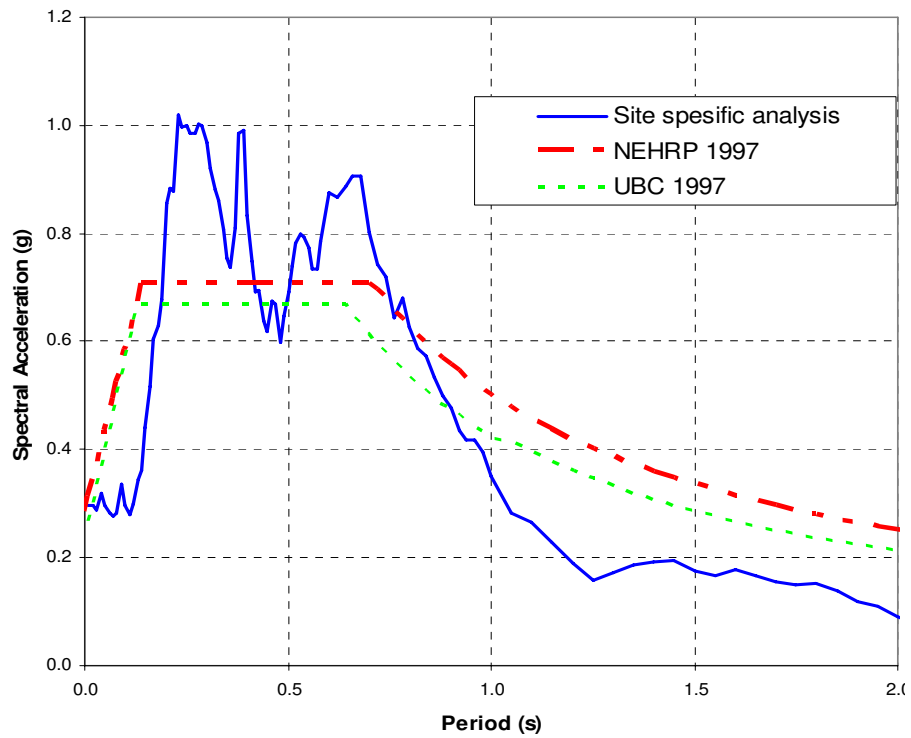
Gambar 12. Distribusi regangan geser maksimum (a) dan percepatan maksimum (b) di kedalaman lapisan tanah



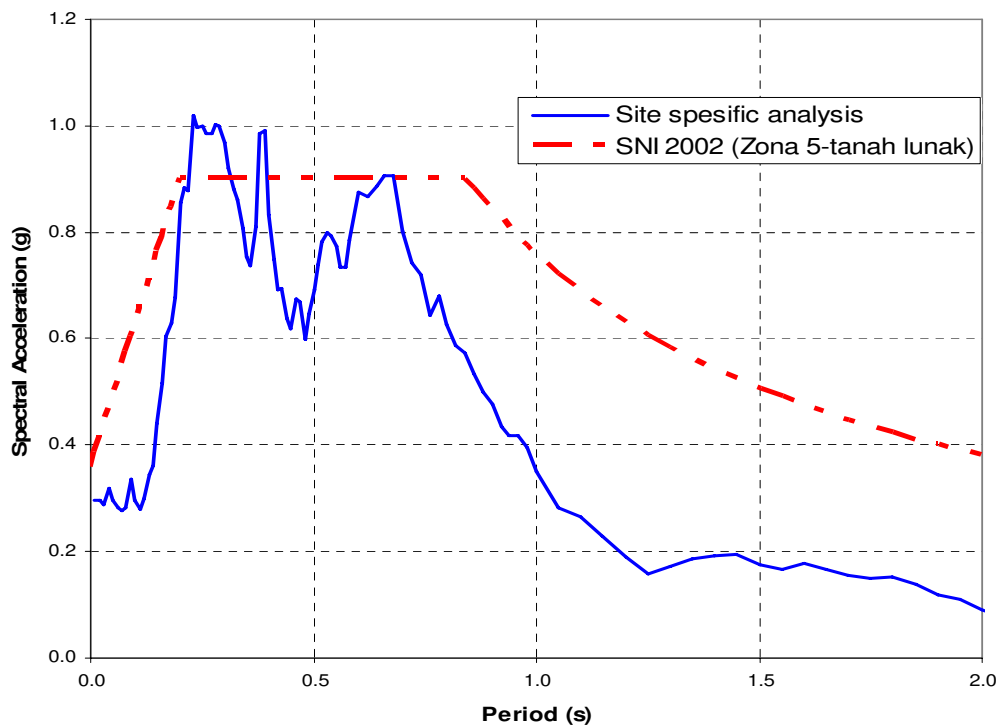
Gambar 13. Riwayat waktu percepatan di permukaan tanah hasil perambatan gelombang gempa berdasarkan data gempa sintetik kejadian Gempa Aceh (2004)



Gambar 14. Respons spektrum percepatan di permukaan tanah hasil perambatan gelombang berdasarkan kejadian Gempa Aceh (2004)



Gambar 15. Perbandingan perkiraan respons spektra permukaan tanah desain berdasarkan kejadian Gempa Aceh (2004)



Gambar 16. Perbandingan respon spektra permukaan berdasar kejadian Gempa Aceh (2004) dengan respons spektra desain untuk tanah lunak pada zona gempa 5 menurut SNI 03-1726-2002

Pada **Gambar 15**, untuk periode lebih kecil dari 0.8 detik umumnya respons spektra di permukaan tanah hasil perambatan gelombang berdasarkan kejadian gempa Aceh (2004) mempunyai spektral percepatan yang lebih tinggi daripada perkiraan respons spektrum desain menurut UBC 1997 maupun NEHRP 1997. Hal ini memberikan suatu gambaran bahwa begitu pentingnya peninjauan dengan metode *site specific response spectra* sebagai alat untuk memperkirakan respons percepatan maksimum pada permukaan tanah yang bergantung pada kondisi tanah lokal.

Respons spektrum di permukaan tanah hasil perambatan gelombang di lokasi kajian juga dibandingkan dengan respons spektrum desain menurut SNI 03-1726-2002 dan dapat dilihat pada **Gambar 16**.

Dalam bentang periode lebih besar dari 0.2 detik dan lebih kecil dari 0.4 detik (**Gambar 16**), respons spektrum di permukaan tanah hasil perambatan gelombang berdasarkan kejadian gempa Aceh (2004) mempunyai spektral percepatan yang lebih tinggi daripada respons spektrum desain untuk tanah lunak pada zona gempa 5 menurut SNI 03-1726-2002. Hal tersebut akan membahayakan bagi desain pembebanan gempa untuk bangunan-bangunan dengan periode struktur yang rendah. Sehingga dapat dikatakankan bahwa selubung respons spektrum untuk tanah lunak pada zona gempa 5 menurut SNI 03-1726-2002 masih cukup handal pada desain pembebanan gempa untuk seluruh bentang periode spektral lebih besar daripada 0.4 detik.

7. Kesimpulan

1. Respons spektrum permukaan hasil perambatan gelombang merupakan sesuatu yang unik untuk masing-masing titik tinjauan Hal ini karena adanya pengaruh frekuensi dari masing-masing material dalam sistem yang dapat menyebabkan perkuatan maupun perlemahan terhadap beban gempa ketika tiba di permukaan tanah. Hal tersebut teramati pada perbedaan nilai spektral percepatan antara yang didapatkan berdasarkan perkiraan dengan memanfaatkan kode standar dan yang didapatkan dengan melakukan suatu analisis *site specific*.
2. Dalam bentang periode lebih besar dari 0.2 detik dan lebih kecil dari 0.4 detik, respons spektrum di permukaan tanah hasil perambatan gelombang berdasarkan kejadian gempa Aceh (2004) mempunyai spektral percepatan yang lebih tinggi daripada respons spektrum desain untuk tanah lunak pada zona gempa 5 menurut SNI 03-1726-2002. Sehingga dapat dikatakankan bahwa selubung respons spektrum untuk tanah lunak pada zona gempa 5 menurut SNI 03-1726-2002 masih cukup handal pada desain pembebanan gempa untuk seluruh bentang periode spektral lebih besar daripada 0.4 detik.

Daftar Pustaka

- Atkinson, G. M., Silva, W., 2000, Stochastic Modeling of California Ground Motions, *Bulletin of The Seismological Society of America*, Vol. 90, pp 255–274.
- Bardet, J., P., Tobita, T., 2001, *NERA - A Computer Program for Nonlinear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits*, Department of Civil Engineering, University of Southern California.
- Boore, D.M., Joyner, W.B., 2000, Recent Developments in Earthquake Ground Motion Estimation, *Proceedings of the 6th International Conference on Seismic Zonation*, California: Palm Springs, November 12-15.
- Boore, D.M., 2000, *SMSIM - Fortran Programs for Simulating Ground Motions from Earthquakes: Version 2.0-A Revision of OFR 96-80-A*, U.S. Geological Survey Open-File Report, OF 00-509, pp. 55, (available at <http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of00-509/>)
- Boore, D.M., 2003, *Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method*, Pure and Applied Geophysics 160, pp 635-676.
- Federal Emergency Management Agency, 1997, *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulation for New Buildings and Other Structures*, Part 1, Provisions, FEMA 302, Prepared by Building Seismic Safety Council, Washington, DC, 337 p.
- Hashash, Y.M.A., Park, D., 2004, Soil Damping Formulation in Non Linear Time Domain Site Response Analyses, *Journal of Earthquake Engineering*, 8(2), pp. 249-274.
- ICBO, 1997, *Uniform Building Code 1997*, California: International Building Officials, Whittier.
- Imai, T., Tonouchi, K., 1982, Correlation of N-value with S-Wave Velocity and Shear Modulus, *Proceeding of Second European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam: The Netherlands, pp. 67-72.
- National Earthquake Information Center, 2004, Magnitude 9.0 off the West Coast of Northern Sumatra – Sunday December 26, 2004 at 00:58:53 Coordinated Universal Time, United States Geological Survey, February 15th, 2005 Available <http://earthquake.usgs.gov/eqinthenews/2004/usslav/>

- Reiter, L., 1990, *Earthquake Hazard Analysis – Issues and Insight*, New York: Columbia University Press.
- Standar Nasional Indonesia, 2002, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung (SNI 03-1726-2002)*, Badan Standardisasi Nasional.
- USGS: U.S. Geological Survey, 2005, *National Earthquake Information Center*, USA: Golden, CO, USA, Magnitude 8.7 Northern Sumatra, Indonesia, March 28 16:09:36 UTC, Available <http://earthquake.usgs.gov/>.
- Youngs, R.R., Chiou, S.J., Silva, W.J., Humphrey, J.R., 1997, *Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes*. *Seismological Research Letters* 68, 58–73.

