

Estimasi Respon Tanah Sedang di Beberapa Lokasi di Kota Medan Akibat Skenario Terburuk Gempa Sumatera

Ade Faisal^{1,2)}

Abstrak

Kota Medan terletak ~80 km dari patahan strike-slip Sumatera dan ~300 km dari pertemuan lempeng Indo-Australian dan Eurasian. Kota ini pernah bergetar hebat tahun 1936 akibat gempa Kutacane (segmen patahan Tripa) $M_s=7,2$ yang menyebabkan sejumlah bangunan rumah rusak. Karena tidak sepenuhnya aman, studi ini melakukan sejumlah kajian skenario gempa terhadap Kota Medan berdasarkan mekanisme dan magnitude gempa, jarak terdekat dan kondisi geoteknik.

Skenario gempa di kawasan Nias berkekuatan $M_w=9,3$ dan gempa $M_w=7,8$ di segmen Tripa/Renun digunakan sebagai skenario terburuk, bersama dengan gempa Aceh 26/12/2004, Nias 28/03/2005 dan Renun 01/04/1921. Kemudian tiga lokasi tanah di Medan dianalisa dengan memakai riwayat waktu percepatan gempa yang berasal dari 21 rekaman nyata gempa-gempa subduksi dan patahan aktif di belahan dunia lain.

Percepatan batuan dasar diperoleh sebesar 0,1002 g dan 0,1420 g, masing-masing akibat gempa subduksi Nias dan segmen patahan Tripa/Renun. Sebanyak 153 respon spektrum percepatan tanah dihasilkan, terdiri dari 81 spektrum akibat gempa subduksi dan 72 spektrum gempa patahan. Respon tanah ini menunjukkan gejala yang harus diwaspadai karena melampaui spektrum rencana tanah sedang dan mencapai nilai atas spektrum rencana tanah lunak SNI-1726-2003 Wilayah 3, pada hampir seluruh perioda waktu.

Kata-kata Kunci: Spektrum respon percepatan, respon tanah, skenario gempa Sumatera.

Abstract

Medan is located ~80 km away from Sumatran strike-slip fault and ~300 km away from boundary of Indo-Australian and Eurasian plates. Medan has been experienced tremor causing damage of some buildings in 1936 due to $M_s=7,2$ earthquake sourced from Kutacane (Tripa fault segment). Since the city was not fully safe, this study conducts an investigation to the effect of worst scenario earthquakes for Medan based on source mechanism, magnitude, closest source-to-site distance, and geotechnical condition.

The subduction earthquakes of $M_w=9,3$ in Nias region and $M_w=7,8$ in Tripa/Renun fault segments are employed as the worst scenario earthquakes for Medan. The earthquakes of Aceh 26/12/2004, Nias 28/03/2005, and Renun 01/04/1921 are took into account as well. Three locations in Medan are then assessed using 21 synthetic time histories accelerations sourced from ground motion record of subduction and strike-slip earthquakes from other countries.

The bedrock peak ground accelerations (PGA) found for Nias subduction region and Tripa/Renun fault segment reach 0,1002 g and 0,1420 g, respectively. This study results 153 soil surface spectrum response accelerations that consist of 81 spectrums and 72 spectrums affected by subduction and transform faults earthquakes. The soil responses due to worst scenario earthquakes show apprehensive trend, which beyond the design spectrum of medium soil in Zone 3 of SNI-1726-2003. It almost reaches soft soil design spectrum at all over periods as well.

Keywords: Response spectrum acceleration, soil response, Sumatran earthquake scenario.

1) Staf Pengajar Program Studi Teknik Sipil, Univ. Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan

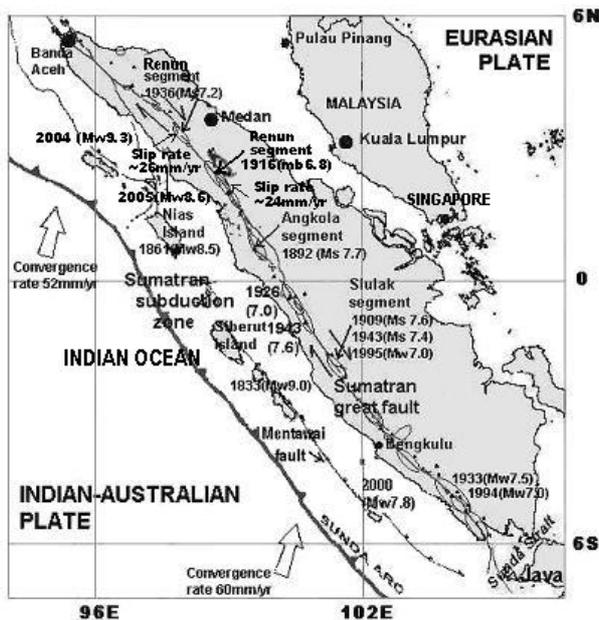
2) Staf Ahli Center of Study and Empowerment for Sumatra Development (CeSESDe)

Catatan : Usulan makalah dikirimkan pada 25 Agustus 2006 dan dinilai oleh peer reviewer pada tanggal 11 September 2006 - 9 Januari 2007. Revisi penulisan dilakukan antara tanggal 15 Januari 2007 hingga 5 Maret 2007.

1. Pendahuluan

Kota Medan terletak ±80 km dari garis patahan aktif *strike-slip* Sumatera dan juga ±300 km dari bidang pertemuan 2 lempeng besar tektonik bumi, Indo-Australia dan Eurasia. Tidak ditemukan patahan aktif yang melintasi kota ini. Namun demikian intensitas getaran yang dirasakan, kejadian demi kejadian, menunjukkan tren peningkatan yang signifikan (USGS, 2005). Sumber permasalahan ini kemungkinan berasal dari gelombang berperiode tinggi yang dihasilkan oleh gempa jauh yang bersumber dari patahan besar Sumatera dan zona subduksi Sumatera, dimana tercatat pernah terjadi gempa raksasa berkekuatan $M_w=9.0$ pada tahun 1833 (Newcomb dan McCann, 1987; Zachariassen dkk., 2000) dan gempa Aceh tahun 2004 (**Gambar 1**).

Sejarah telah mencatat bahwa gempa berkekuatan $M_S=8,1$ dari jarak 350 km mampu memporak-porandakan hampir seluruh bangunan bertingkat di kota Mexico City secara dramatis pada tahun 1985 akibat amplifikasi respon tanah yang tinggi (Campillo dkk., 1989). Kerusakan-kerusakan pada sejumlah bangunan rumah juga pernah terjadi di Kota Medan pada abad ke-20, yaitu tepatnya tahun 1936, dimana gempa berkekuatan $M_S=7,2$ muncul dari kawasan Kutacane, yang berjarak ±135 km dari Kota Medan (Soetardjo dkk., 1985). Catatan gempa di Sumatera yang tidak lengkap dalam 200 tahun terakhir ini masih belum dapat memberikan informasi bahwa Kota Medan aman dari gempa jauh. Sehingga sejauh mana gempa jauh akan menghasilkan getaran ke Kota Medan dan mempengaruhi bangunan-bangunan yang ada sudah sangat perlu untuk diperkirakan. Untuk itu



Gambar 1. Keadaan tektonik dan rangkuman gempa Sumatera (Faisal, 2005)

studi ini akan mencoba menentukan skenario gempa terburuk dalam hal magnituda gempa, jarak terdekat sumber gempa dan riwayat waktu percepatan sintetik untuk mengetahui spektrum respon percepatan pada beberapa lokasi di Kota Medan dan membandingkannya dengan respon spektrum rencana SNI-1726-2003.

2. Tinjauan Tentang Kegempaan Daerah Kota Medan

2.1 Skenario gempa

Bahaya gempa maksimum yang mungkin dihadapi oleh Kota Medan didefinisikan sebagai skenario gempa yang pernah dirasakan secara maksimal pada radius ≤500 km dari Kota Medan berdasarkan studi pustaka. Secara umum penentuan skenario gempa ini didasarkan kepada metode tertentu atau metode DSHA (*Deterministic Sesimic Hazard Analysis*).

2.2 Gelombang sintetik gempa

Gelombang sintetik gempa berdasarkan gempa patahan *strike-slip* dan subduksi diperoleh dari *database* percepatan gempa nyata milik PEER University of California at Berkeley (<http://peer.berkeley.edu/smcat>). Gelombang sintetik batuan dasar di Kota Medan akibat gempa subduksi jauh diasumsikan relatif memiliki frekwensi yang rendah dan berdurasi panjang, sedangkan gempa-gempa *strike-slip* memiliki frekwensi yang lebih tinggi dan durasi lebih pendek. Riwayat waktu gelombang gempa ini dipilih berdasarkan metode yang ditawarkan Bommer dan Acevedo (2004) yaitu magnituda (M), jarak hiposenter (R), kesesuaian terhadap klasifikasi lokasi dan mekanisme gempa.

Sebanyak 21 rekaman gempa yang dipilih adalah berasal dari gempa di kawasan-kawasan subduksi Michoacan (Meksiko), Valparaiso (Cili), Peru, Alaska dan gempa dari kawasan-kawasan patahan *strike-slip* San Andreas (California) dan Anatoli Utara (Turki). Daftar rekaman-rekaman gempa yang dipilih ini dibuat pada **Tabel 1**.

2.3 Percepatan puncak batuan dasar

Atenuasi percepatan di batuan dasar Kota Medan diperoleh melalui hubungan Youngs dkk. (1997) dan hubungan Youngs dkk (1997) dimodifikasi oleh Petersen dkk. (2004) untuk percepatan yang bersumber dari gempa-gempa subduksi *interface*, sedangkan untuk gempa *strike-slip* akan digunakan Campbell (2003). Hubungan Youngs dkk. (1997) digunakan untuk gempa subduksi *interface* yang memiliki jarak ke lokasi $R < 200$ km, sedangkan hubungan Youngs dkk. (1997) dimodifikasi Petersen dkk (2004) untuk gempa subduksi dengan $R > 200$ km.

Sudut tukik subduksi yang dipakai sebesar 17° (Kertapati, 1999) yaitu pada zona subduksi Wadati (*megathrust*). Batuan dasar di Kota Medan diasumsikan memiliki kecepatan gelombang geser (V_s) sebesar 750 m/det atau $N_{SPT\text{rata-rata}}=60$ pada kedalaman 30 m. Kedalaman ini dipilih berdasarkan batas kedalaman uji penetrasi yang dilakukan pada data sampling.

2.4 Kecepatan gelombang geser tanah

Kategori tanah yang ditinjau pada lokasi-lokasi di Kota Medan diambil berdasarkan klasifikasi SNI (2003) ditambah dengan BSSC (2001) dan Rodriguez-Marek dkk. (2000), seperti pada **Tabel 2** dan **3**. Untuk masing-masing lokasi hanya dipilih data-data N_{SPT} yang memberikan nilai yang paling kritis untuk ketiga kategori di atas. Fungsi hubungan N_{SPT} dan kecepatan gelombang geser tanah (V_s) yang digunakan dalam studi ini adalah fungsi Imai dan Yoshimura (1990):

$$V_s = 76 N_{SPT}^{0,33}$$

Dimana fungsi korelasi ini dihasilkan di Jepang melalui pengujian terhadap seluruh jenis tanah menggunakan uji penetrasi standar dan metode *seismic*.

2.5. Respon tanah

Untuk melihat respon tanah yang terjadi akibat sebuah gempa, beberapa data-data dari 3 lokasi di Kota Medan dianalisa secara satu dimensi berdasarkan metode Schnabel dkk. (1972) dengan asumsi material

tanah berperilaku nonlinear. Simulasi respon tanah ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak NERA (Bardet dan Tobita, 2001). Data masuk yang dibutuhkan oleh program ini adalah:

- Getaran gempa (beda waktu antar rekaman percepatan, percepatan puncak dan rekaman riwayat waktu percepatan)
- Properti lapisan tanah (jenis tanah, tebal lapisan, berat isi total, kecepatan gelombang geser dan kedalaman muka air tanah)
- Properti dinamis tanah (rasio redaman kritis; modulus geser dan rasio redaman yang diambil dari Seed dan Idriss (1970), Seed dan Sun (1989), Idriss (1990), Schnabel (1973) dan Vucetic dan Dobry (1991)).

Data keluar yang diberikan program ini berupa perioda alami, kecepatan gelombang geser rata-rata, riwayat waktu percepatan (berserta percepatan puncak) pada setiap lapisan tanah, rasio amplifikasi, spektrum Fourier dan spektrum respon percepatan. Pada studi ini, hasil akhir spektrum respon percepatan dibuat dalam bentuk nilai rata-rata ditambah dengan simpangan bakunya (*mean +1s*) untuk setiap lokasi sampling dan skenario gempa.

2.6. Prosedur kajian

Untuk mendapatkan hasil yang diharapkan studi ini menggunakan sejumlah prosedur yang diilustrasikan pada **Gambar 2**.

Tabel 1. Rekaman gempa yang dipilih sebagai getaran sintetik gempa Sumatera

Nama gempa	Tanggal	Kawasan	Magnituda	Stasiun perekam getaran gempa
Peru	17/10/1966	Subduksi Peru	$M_w=8,0$	Instituto Geofisico del Peru N08E
Peru	17/10/1966	Subduksi Peru	$M_w=8,0$	Instituto Geofisico del Peru N82W
Alaska	30/07/1972	Subduksi Alaska	$M_w=7,5$	Sitka
Alaska	12/02/1979	Subduksi Alaska	$M_w=7,3$	Ici Bay
Chile	03/03/1985	Subduksi Cili	$M_w=7,8$	Valparaiso
Michoacan	19/09/1985	Subduksi Meksiko	$M_w=8,1$	Caleta De Campos
Michoacan	19/09/1985	Subduksi Meksiko	$M_w=8,1$	OCTT
Nisqually	28/02/2001	Subduksi Cascadia	$M_w=6,8$	Anacortes Fire Station
Nisqually	28/02/2001	Subduksi Cascadia	$M_w=6,8$	Chief Joseph Dam
Imperial Valley	18/05/1940	Patahan SAF*	$M_w=6,5$	El Centro
Imperial Valley	19/05/1940	Patahan SAF*	$M_w=6,9$	El Centro
Kern County	21/07/1952	Patahan SAF*	$M_w=7,5$	Pasadena-Athenaeum
Borrego Mountain	09/04/1968	Patahan SAF*	$M_w=6,5$	Pasadena-Athenaeum
San Fernando	09/02/1971	Patahan SAF*	$M_w=6,6$	Pasadena-Athenaeum
Loma Prieta	18/10/1989	Patahan SAF*	$M_w=7,0$	Los Gatos
Landers	17/06/1992	Patahan SAF*	$M_w=7,3$	Amboy
Landers	17/06/1992	Patahan SAF*	$M_w=7,3$	Poppet-Silent Valley
Northridge	17/01/1994	Patahan SAF*	$M_w=6,9$	Arcadia
Izmit-Kocaeli	17/08/1999	Patahan NAF**	$M_w=7,4$	Maslak
Izmit-Kocaeli	17/08/1999	Patahan NAF**	$M_w=7,4$	Mecidiyekoy
Duzce	12/11/1999	Patahan NAF**	$M_w=7,1$	Arcelik

*) SAF = patahan strike-slip San Andreas, California

**) NAF = patahan strike-slip Anatoli Utara, Turki

Tabel 2. Kategori lokasi menurut NEHRP 2000 (BSSC, 2001)

Kategori	Deskripsi	Kecepatan geser tanah rata-rata sampai kedalaman 30 m
A	<i>Hard rock</i>	> 1500 m/det
B	<i>Firm to hard rock</i>	760 – 1500 m/det
C	<i>Dense soil, soft rock</i>	360 – 760 m/det
D	<i>Stiff soil</i>	180 – 360 m/det
E	<i>Soft clays</i>	< 180 m/det
F	<i>Special study soils, e.g., liquefiable soils, sensitive clays, organic soils, soft clays > 36 m thick</i>	

3. Analisa Bahaya Gempa

3.1. Gempa-gempa yang mempengaruhi Kota Medan

Gempa-gempa yang dirasakan penduduk adalah Gempa Nias 16 Februari 1861, gempa Renun 01 April 1921, Gempa Tripa 09 September 1936, yang diambil berdasarkan Soetardjo dkk. (1985), Sieh dan Natawidjaja (2000), serta Sun dan Pan (1995). Kemudian ditambah dengan gempa-gempa terkini yaitu Gempa Aceh 26 Desember 2004 dan Gempa Nias 28 Maret 2004.

3.2. Skenario gempa terburuk untuk Kota Medan

Dalam menentukan skenario gempa terburuk, Kota Medan dianggap terletak pada koordinat 98,67°BT dan 3,38°LU. Untuk skenario terburuk gempa patahan *strike-slip*, parameter jarak terdekat ke pusat gempa (R) yang pernah terjadi dipilih berdasarkan gempa 1921 di Renun ($M_s=7,0$, $R=112,5$ km dan $H=25$ km), gempa

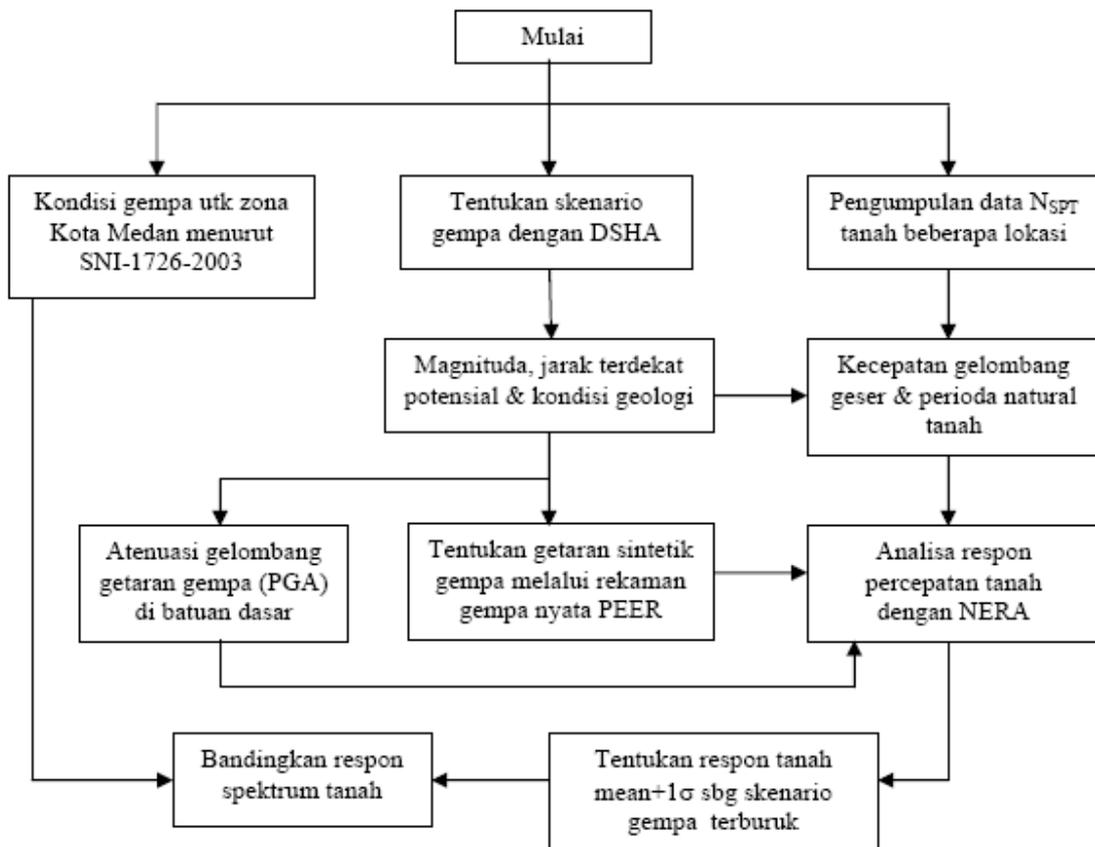
1936 di Tripa ($M_b=7,2$, $R=141$ km dan $H=25$ km) dan gempa 1936 di Tripa ($M_s=7,2$, $R=71$ km dan $H=25$ km). Sedangkan magnituda skenario terburuk gempa patahan *strike-slip* diambil berdasarkan data geometri bidang runtuh permukaan segmen patahan Tripa sebesar 180 km dan segmen patahan Renun sebesar 220 km (Sieh dan Natawidjaja, 2000; Natawidjaja dkk., 2004). Jarak terdekat ke bidang runtuh (R_r) segmen Tripa dan Renun ke Kota Medan diperkirakan sebesar 71 km (**Gambar 3**), diukur berdasarkan peta tektonik Sieh dan Natawidjaja (2000) dan memiliki kedalaman $H=25$ km. Studi ini mengasumsikan bahwa segmen Tripa juga dapat memproduksi gempa sebesar $M_w=7,8$, walaupun berdasarkan hubungan Wells dan Coppersmith (1994) magnituda gempa segmen patahan Tripa ($M_w=7,7$) lebih kecil dari gempa segmen Renun ($M_w=7,8$).

Skenario gempa segmen Tripa/Renun ini juga diambil berdasarkan asumsi bahwa gempa yang terjadi pada segmen patahan Angkola, yang hanya memiliki panjang reruntuhan segmen dan rata-rata *slip* tahunan lebih kecil dari segmen Renun, mampu mencapai $M_s=7,7$ di tahun 1892. Gempa ini bisa jadi merupakan efek samping dari pergerakan subduksi pada gempa *interface* $M_w=9,0$ tahun 1833 di kawasan Mentawai dan gempa $M_w=8,5$ di kawasan Nias tahun 1861. Posisi segmen Angkola ini berada di sekitar arah timur kawasan pertemuan reruntuhan gempa subduksi Mentawai tahun 1833 dan gempa Nias tahun 1861, sebuah kawasan yang *analog* dengan kawasan segmen Tripa/Renun diantara kawasan reruntuhan gempa subduksi Aceh 2004 dan Nias 2005.

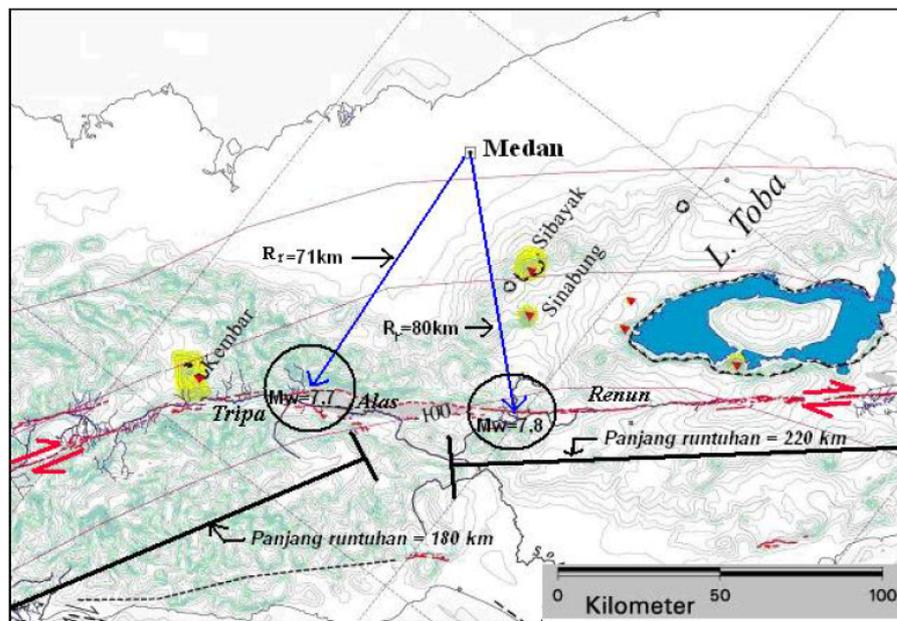
Untuk kasus gempa subduksi pemilihan skenario gempa terburuk didasarkan kepada beberapa hal berikut ini:

Tabel 3. Kategori lokasi berdasarkan kondisi geoteknik (Rodriguez-Marek dkk., 2001)

Kategori	Deskripsi geoteknik	Aproksimasi perioda pada lokasi (det)	Penjelasan
A	<i>Hard rock</i>	≤ 0.1	Batuan dasar Crystalline, $V_s \geq 1500$ m/det
B	<i>Competent bedrock</i>	≤ 0.2	$V_s \geq 600$ m/det atau kedalaman <10 m. Kebanyakan batuan California <i>unweathered</i> .
C1	<i>Weathered rock</i>	≤ 0.4	$V_s \approx 300$ m/det sampai dengan > 600 m/det, 10 m < weathering zone < 30 m
C2	<i>Shallow stiff soil</i>	≤ 0.5	10 < kedalaman tanah < 30 m
C3	<i>Intermediate depth Stiff soil</i>	≤ 0.8	30 < kedalaman tanah < 60 m
D1	<i>Deep stiff holocene soil</i>	≤ 1.4	60 < kedalaman tanah < 200 m
D2	<i>Deep stiff pleistocene soil</i>	≤ 1.4	60 < kedalaman tanah < 200 m
D3	<i>Very deep stiff soil</i>	≤ 2.0	kedalaman tanah > 200 m
E1	<i>Medium thickness soft clay</i>	≤ 0.7	Tebal lapisan tanah lempung lunak 3-12 m
E2	<i>Deep soft clay</i>	≤ 1.4	Tebal lapisan tanah lempung lunak > 12 m
F	<i>Potentially liquefiable sand</i>		Pasir lepas <i>Holocene</i> dengan muka air tanah yang tinggi ($Z_w \leq 6$ m)



Gambar 2. Skema prosedur kajian yang dilaksanakan



Gambar 3. Skenario gempa dangkal patahan aktif untuk Kota Medan (dimodifikasi dari Sieh dan Natawidjaja (2000))

1. Gempa-gempa *interface* signifikan yang pernah terjadi di kawasan Nias dan Seulimeum (Aceh) selama 200 tahun terakhir seperti gempa 1861 di Nias ($M_w=8,5$, $R=283\text{km}$ dan $H=30\text{km}$), gempa 2004 di Aceh ($M_w=9,0-9,3$ (USGS dan Caltech), $R=300\text{km}$ dan $H=30\text{km}$), gempa 2005 di Nias ($M_w=8,7$, $R=225\text{km}$ dan $H=30\text{km}$).
2. Gempa di kawasan Nias dapat saja meningkat kekuatannya di masa depan, seperti gempa $M_w=8,5$ tahun 1861 menjadi $M_w=8,7$ pada tahun 2005. Kemudian posisi gempa Nias tahun 1861 dekat dengan Gempa Aceh 2004 dan belum ada bukti jelas yang menyatakan runtuhnya gempa Nias 1861 tidak mencapai kawasan runtuhnya gempa Aceh 2004.
3. Titik lokasi gempa susulan berpeluang menjadi tempat terjadinya gempa utama subduksi *interface*. Untuk itu dengan memakai pembeda gempa utama dan gempa susulan Gardner dan Knopoff (1974), yaitu $4,0 < M_w < 8,4$ dalam $30 \text{ km} < \text{radius} < 94 \text{ km}$, diambil skenario jarak terdekat gempa subduksi ke Kota Medan melalui jarak terdekat gempa subduksi yang pernah terjadi dikurangi 30 km (**Gambar 4**).
4. Zachariassen dkk., (2000) menyatakan bahwa kawasan subduksi Sumatera telah memproduksi gempa maksimum mencapai $M_w=9,2$ setiap 265 tahun.
5. Nilai magnituda gempa Aceh 2004 yang diestimasi Caltech $M_w=9,3$ berdasarkan hasil penyelidikan geologi *coral microatoll* (lihat Sieh dan Natawidjaja, 2000; Zachariassen dkk., 2000) lebih besar dibanding dengan yang dikeluarkan USGS ($M_w=9,0$).

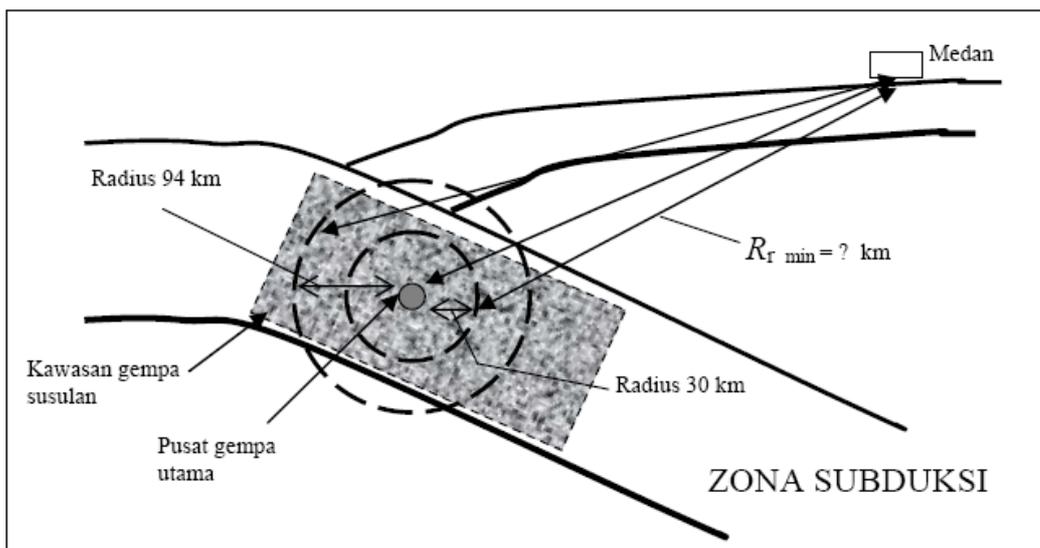
Dari ketiga pertimbangan ini menunjukkan bahwa gempa subduksi raksasa berkekuatan $M_w=9,0$ cukup logis dapat terjadi di kawasan Nias seperti yang terjadi di kawasan Simeuleu (Aceh), sehingga nilai $M_w=9,3$ dan jarak terdekat runtuhnya ke Kota Medan $R_r=195 \text{ km}$ dipilih sebagai skenario gempa subduksi terburuk.

3.3. Estimasi PGA batuan dasar Kota Medan

Hasil estimasi percepatan puncak (PGA) untuk Kota Medan ditunjukkan pada **Tabel 4** dimana tampak gempa Nias 28/03/2005 memberikan PGA lebih besar dibanding gempa Aceh 26/12/2005. Namun demikian skenario terburuk gempa subduksi *interface* $M_w=9,3$ pada jarak $R=195\text{km}$ menghasilkan percepatan hampir dua kali lipat dari gempa Nias 28/03/2005. Hasil yang diperoleh untuk skenario terburuk gempa *strike-slip* dari kawasan segmen patahan Tripa/Renun menghasilkan sebuah PGA batuan dasar mencapai dua kali lipat dari nilai PGA gempa $M_s=7,0$ di Renun pada 01/04/1921.

Hasil-hasil yang diperoleh tersebut tampak lebih kecil dibandingkan dengan $\text{PGA}=0,150\text{g}$ dari SNI (2003), dan $\text{PGA}=0,250\text{g}$ dari Petersen dkk. (2004). Perlu diketahui bahwa hubungan atenuasi dalam menentukan PGA yang digunakan di SNI (2003) adalah Crouse (1991) dan Youngs dkk. (1997) untuk gempa-gempa subduksi *interface* serta Fukushima dan Tanaka (1990) untuk gempa-gempa patahan aktif *strike-slip*. Sedangkan Petersen dkk. (2004) menggunakan hubungan atenuasi Sadigh dkk. (1997) untuk gempa *strike-slip* dan memodifikasi hubungan Youngs dkk. (1997) untuk gempa subduksi.

Hasil akhir PGA pada SNI (2003) dan Petersen dkk. (2004) dibuat melalui rata-rata sejumlah analisa probabilitas bahaya gempa (*probabilistic seismic hazard*



Gambar 4. Penentuan jarak terdekat gempa subduksi *interface* menggunakan asumsi radius gempa susulan Gardner dan Knopoff (1974)

Tabel 4. Percepatan puncak (PGA) batuan dasar di Kota Medan akibat sejumlah skenario gempa

No.	M_w, R_f, H	PGA (g)		
		Youngs dkk. (1997)	Youngs dkk. (1997) modif	Campbell (2003)
1.	Gempa Aceh 26/12/2004 $M_w=9,0; R=322 \text{ km}; H=30 \text{ km}$	–	0.0313	–
2.	Gempa Nias 28/03/2005 $M_w=8,7; R=225 \text{ km}; H=30 \text{ km}$	–	0.0531	–
3.	Skenario terburuk gempa subduksi di Nias $M_w=9,3; R=195 \text{ km}; H=30 \text{ km}$	0,1002	–	–
4.	Gempa Renun 01/04/1921 $M_s=7,0; M_w=7,1; R=112,5 \text{ km}; H=25 \text{ km}$	–	–	0,0713
5.	Skenario terburuk gempa di segmen Tripa/Renun $M_w=7,8; R=71 \text{ km}; H=25 \text{ km}$	–	–	0,1420

analysis) yang menggunakan persentase peluang kemunculan 10% untuk bangunan yang memiliki umur layan 50 tahun. Sebagai tambahan, bila hubungan Fukushima dan Tanaka (1990) digunakan secara langsung kepada skenario gempa terburuk $M_w=7,8$ dan $R=71 \text{ km}$ dari segmen Tripa/Renun akan menghasilkan $PGA=0,1506g$, nilai yang nyaris sama dengan SNI (2003). Ini menunjukkan bahwa hasil yang diperoleh dari studi ini melalui metode DSHA dapat dianggap memenuhi.

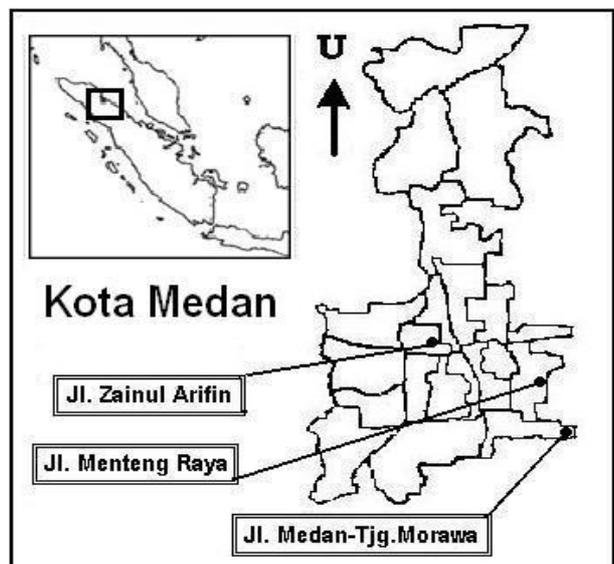
3.4 Analisa respon dinamik tanah setempat

Lokasi tanah setempat yang ditinjau untuk sampling terletak di Jl. Zainul Arifin, Jl. Menteng Raya dan Jl. Medan-Tanjung Morawa. Lokasi-lokasi ini terletak di pusat kota dan bagian selatan Kota Medan, seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Kondisi tanah pada lokasi ini sampai rata-rata kedalaman 4,5 meter umumnya terdiri dari tanah lempung berpasir berkadar air sedang dengan warna abu-abu dan coklat serta plastisitas sedang. Di bawah lapisan ini terdapat pasir halus berlempung dan berlanau dengan kadar air rendah dan tidak plastis serta berwarna coklat dan sangat lepas sampai kedalaman 15-20 meter. Di bawah lapisan tanah tersebut terdapat pasir halus ke sedang dan pasir sedang ke kasar berwarna abu-abu tua yang berbatuan karang muda dan batuan apung yang memiliki kadar air yang rendah dan kepadatan yang tinggi sampai kedalaman kurang lebih 30 meter. Ketiga tanah tersebut adalah tergolong kepada Tanah Sedang menurut SNI (2003), atau Tanah Kategori D (*stiff soil*) menurut NEHRP 2000 (BSSC, 2001), atau Tanah Kategori C2 dan C3 (*shallow-intermediate stiff soil*) menurut Rodriguez-Marek dkk. (2001).

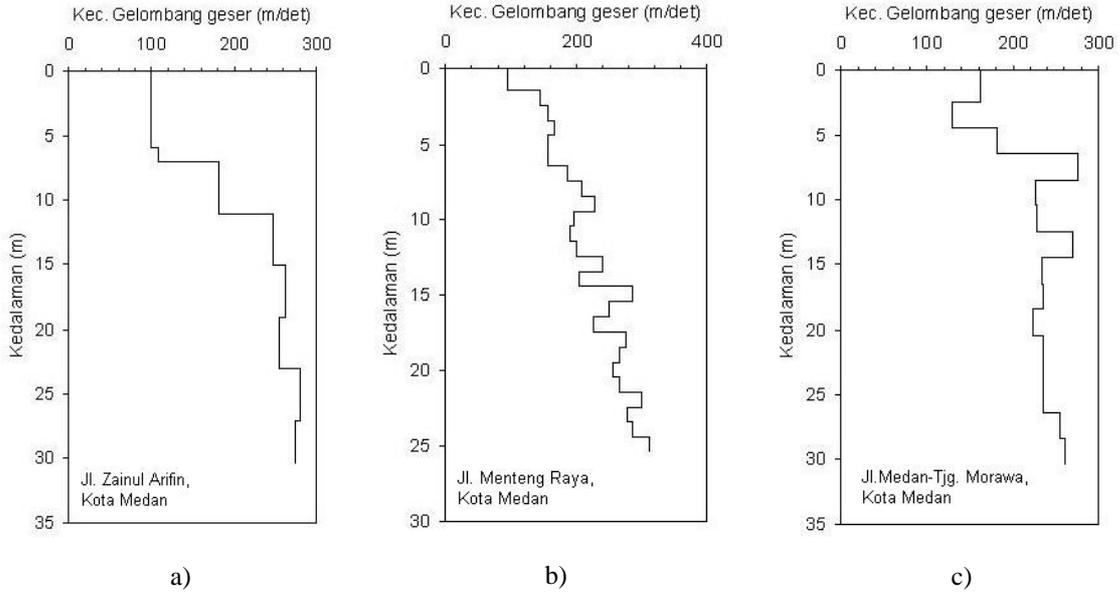
Kecepatan gelombang geser rata-rata dan perioda alami ketiga lokasi yang ditinjau pada studi ini adalah $V_s=215\text{m/detik}$ dan $T=0,57 \text{ detik}$ (Jl. Zainul Arifin), $V_s=219\text{m/detik}$ dan $T=0,46 \text{ detik}$ (Jl. Menteng Raya) dan $V_s=225\text{m/detik}$ dan $T=0,54 \text{ detik}$ (Jl. Medan-Tanjung Morawa). Karakter kecepatan gelombang geser setiap lapisan tanah hasil simulasi dengan NERA ditunjukkan pada Gambar 6.

Jumlah total respon tanah yang dihasilkan adalah sebanyak 153 respon spektrum dengan menggunakan 9 rekaman gempa subduksi (Peru, Alaska, Michoacan, Chile dan Cascadia) dan 12 rekaman gempa patahan *strike-slip* (Elcentro, Kern, Borrego, San Fernando, Loma Prieta, Landers, Northridge, Izmit-Kocaeli, dan Duzce). Untuk setiap lokasi yang ditinjau dihasilkan 27 respon akibat gempa subduksi dan 24 respon akibat gempa *strike-slip*. Sehingga respon tanah masing-masing lokasi akibat skenario terburuk gempa Sumatera merupakan hasil $mean+1s$ dari 51 spektrum respon. Pada Gambar 7 dan 8 ditunjukkan respon permukaan tanah terhadap seluruh rekaman gempa yang mewakili keadaan gempa di kawasan patahan aktif *strike-slip* segmen Tripa/Renun dan subduksi Nias. Garis tebal hitam dan garis terputus-putus tebal hitam pada gambar tersebut mewakili nilai $mean$ dan $mean+1s$ respon tanah di ketiga lokasi.

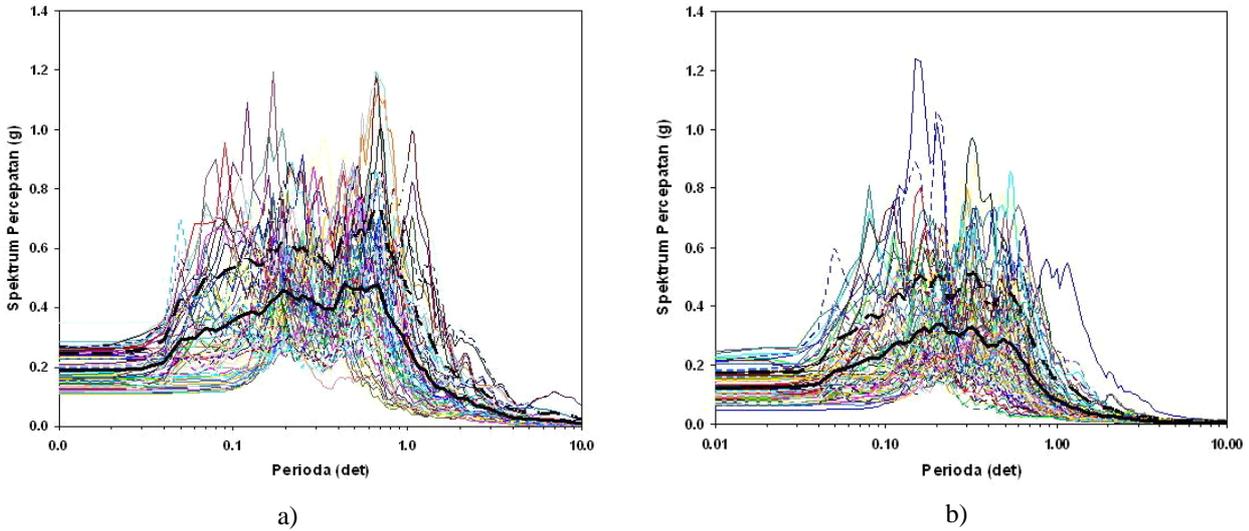
Nilai puncak dari $mean$ respon percepatan dari ketiga lokasi ini mencapai $RSA=0,480 g$ pada $T=0,44 \text{ detik}$. Nilai puncak yang hampir sama juga terjadi pada



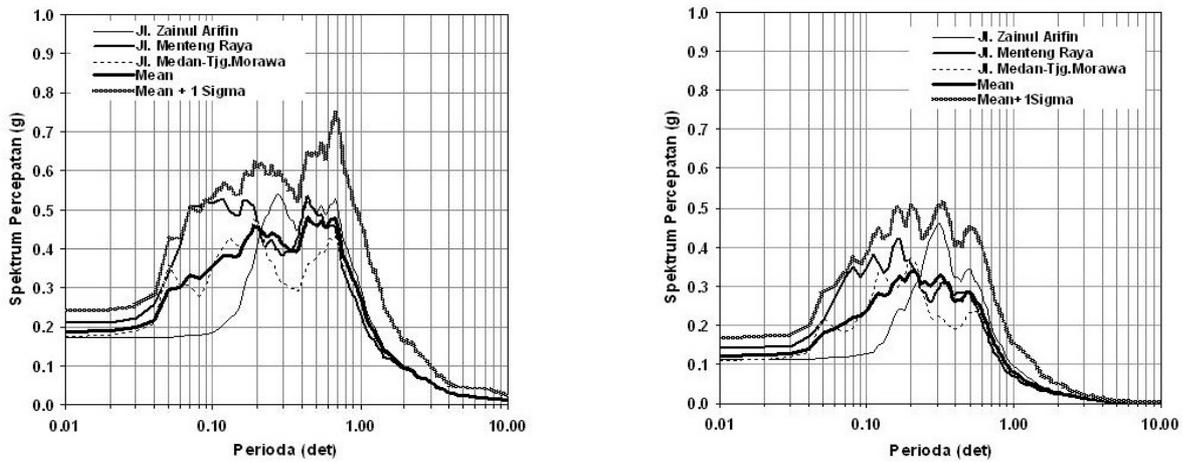
Gambar 5. Sketsa lokasi sampling tanah sedang di Kota Medan



Gambar 6. Distribusi kecepatan gelombang geser tanah setempat berdasarkan NERA



Gambar 7. Respon percepatan tanah simulasi di beberapa lokasi di Medan akibat skenario gempa terburuk: a) patahan *strike-slip*, dan b) subduksi Sumatera



Gambar 8. Respon tanah sedang simulasi di beberapa lokasi di Kota Medan akibat skenario gempa terburuk: a) patahan *strike-slip*, dan b) subduksi Sumatera

periode $T=0,68$ detik yaitu sebesar $RSA=0,477$ g. Pada kondisi $mean+1\sigma$ nilai puncak respon justru terjadi pada periode 0,68 detik sebesar $RSA=0,748$ g, berbeda 0,1 g dengan nilai respon yang terjadi pada periode $T=0,44$ detik.

Bentuk selubung respon rata-rata ($mean$ dan $mean+1\sigma$) secara umum dipengaruhi oleh respon tanah di lokasi kawasan Jl. Menteng Raya. Rekaman gempa yang paling dominan mempengaruhi nilai puncak respon tanah adalah rekaman gempa Nisqually 21-02-2001 dari stasiun pencatat Chief Joseph Dam yaitu pada lokasi kawasan Jl. Menteng Raya mencapai 1,24 g pada periode 0,15 detik. Nilai puncak rata-rata respon tanah terhadap rekaman gempa subduksi mencapai $RSA=0,335$ g pada $T=0,21$ detik. Nilai ini jauh di bawah nilai puncak spektrum Tanah Sedang Wilayah 3 SNI (2003). Sedangkan untuk kondisi $mean+1\sigma$, nilai puncak respon tanah yang diperoleh adalah sebesar 0,512 g pada periode yang tidak sama dengan kondisi $mean$ yaitu $T=0,32$ detik.

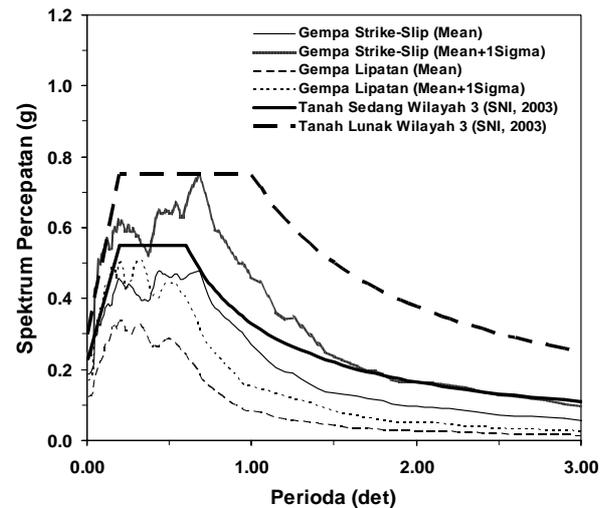
Selubung respon tanah ($mean$) akibat gempa subduksi di lokasi kawasan Jl. Zainul Arifin yang memiliki bentuk bukit lebih langsing dari selubung respon tanah lainnya (sama langsing seperti akibat gempa *strike-slip*) tampak mendominasi mulai dari periode 0,25 detik sampai periode berikutnya. Hal ini sedikit berbeda dengan respon tanah akibat gempa subduksi yang mulai mendominasi pada periode 0,20 detik. Bentuk selubung respon spektrum $mean$ dan $mean+1\sigma$ tampak sangat jelas terpengaruh oleh selubung spektrum *uniform* respon tanah di lokasi kawasan Jl. Menteng Raya dan Jl. Zainul Arifin.

Secara jelas tampak pada **Gambar 9** bahwa respon spektrum akibat rekaman gempa subduksi masih dapat terwakili oleh spektrum Tanah Sedang Wilayah 3 SNI (2003) dan begitupula halnya dengan nilai $mean$ respon tanah akibat gempa patahan aktif *strike-slip*.

Keadaan yang ekstrim justru terjadi pada kasus respon tanah kondisi $mean+1\sigma$ akibat gempa patahan aktif *strike-slip* yang hampir pada seluruh periode waktu 0,05-3,00 detik spektrum percepatannya melampaui spektrum Tanah Sedang Wilayah 3 SNI (2003). Nilai puncak respon tanah pada kasus ini hampir mencapai spektrum Tanah Lunak Wilayah 3 SNI (2003) yaitu mencapai $RSA=0,748$ g.

4. Kesimpulan

Studi ini pada umumnya merupakan sebuah simulasi skenario terburuk gempa jauh Sumatera yang dikenakan terhadap 3 lokasi di Kota Medan guna mengetahui seberapa jauh tanah di lokasi ini merespon getaran gempa jauh tersebut. Secara prinsip studi ini menggunakan metode DSHA (metode tertentu). Untuk mendapatkan hasil yang mewakili keadaan sebenarnya



Gambar 9. Respon tanah sedang di Kota Medan hasil simulasi akibat skenario gempa terburuk subduksi dan patahan *strike-slip*

studi ini meninjau sejumlah rekaman gempa yang pernah terjadi di belahan dunia lain dan sejumlah hubungan atenuasi juga ditelusuri. Tinjauan ini dibuat berdasarkan kepada keadaan di sumber gempa, magnituda dan jarak gempa Sumatera ke lokasi yang akan ditinjau.

Hasil studi menunjukkan bahwa skenario terburuk gempa jauh Sumatera secara metode DSHA dapat mencapai $M_w=9,3$ di kawasan Nias dan $M_w=7,8$ di kawasan segmen patahan aktif Tripa/Renun. Jarak terdekat ke bidang runtuh sumber gempa untuk skenario terburuk ini mencapai $R_f=195$ km untuk gempa subduksi di Nias dan $R_f=71$ km untuk gempa patah aktif *strike-slip* segmen Tripa/Renun.

Hubungan atenuasi yang dianggap sesuai untuk Kota Medan akibat kasus gempa Sumatera adalah hubungan Youngs dkk. (1997), Youngs dkk. dimodifikasi oleh Petersen dkk. (2004) untuk percepatan puncak atau PGA akibat gempa subduksi *interface* di kawasan Nias. Sedangkan untuk PGA akibat gempa di patahan aktif segmen Tripa/Renun dipilih hubungan Campbell (2003). Hasil PGA maksimum pada batuan dasar yang diperoleh untuk Kota Medan (0,140 g) menunjukkan perbedaan 1% dengan SNI (2003).

Dari hasil studi terhadap jenis Tanah Sedang di tiga lokasi yang berlainan yaitu Jl. Zainul Arifin, Jl. Menteng Raya dan Jl. Medan-Tanjung Morawa menunjukkan bahwa amplifikasi spektrum terjadi dengan cukup tinggi. Namun demikian spektrum respon tanah di ketiga lokasi tersebut pada umumnya masih dapat terwakili oleh SNI (2003). Kecuali spektrum respon kondisi $mean+1\sigma$ (kondisi ini umumnya dipakai untuk spektrum disain) di lokasi kawasan Jl. Menteng Raya akibat skenario gempa patahan aktif *strike-slip* segmen Tripa/Renun yang nilai puncak percepatannya melampaui 0,1 g dari spektrum

disain SNI (2003) untuk Tanah Sedang Wilayah 3. Kemudian selubung spektrum respon tanah kondisi ini juga memiliki perioda waktu yang sangat signifikan dalam melampaui spektrum Tanah Sedang Wilayah 3 SNI (2003) yaitu mencapai kurang lebih 2 detik. Rentang perioda waktu tersebut jelas akan lebih mempengaruhi struktur-struktur bangunan yang berada di atas tanah tersebut.

5. Ucapan Terima Kasih

Tulisan ini dibuat berdasarkan laporan-laporan hasil penelitian yang didanai oleh Research Grant Technological and Professional Skills Development Sector Project (TPSDP) Batch III ADB Loan 1792-INO tahun 2004 kontrak nomor: 011/C/RG/SPMU-TPSDP-UMSU/08.04 dan Dosen Muda DP2M Ditjen Dikti kontrak nomor: 06/D3/O/2005, untuk itu penulis mengucapkan banyak terima kasih. Penulis juga berterima kasih atas komentar dan saran dari para penilai/pembahas.

Daftar Pustaka

- Bardet, J.P. dan Tobita, T., 2001, "NERA: A Computer Program for Nonlinear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits", Los Angeles: University of Southern California.
- Bommer, J.J. dan Acevedo A.B., 2004, "The Use of Real Earthquake Accelerograms as Input to Dynamic Analysis", Journal of Earthquake Engineering, 8 (1), hal. 43-91.
- BSSC, 2001, "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures 2000 Edition", part 1- provisions (FEMA 368). Building Seismic Safety Council. Washington, D.C.: Building Seismic Safety Council.
- Campbell, K.W., 2003, "Prediction of Strong Ground Motion Using the Hybrid Empirical Method and Its Use in the Development of Ground-Motion (Attenuation) Relations in Eastern North America", Bulletin of the Seismological Society of America, 93 (3), hal. 1012-1033.
- Campillo, M., Gariel, J.C., Aki, K., dan Sanchez-Sesma, F.J., 1989, "Destructive Strong Ground Motion in Mexico City: Source, Path, and Site Effects During Great 1985 Michoacan Earthquake". Bulletin of the Seismological Society of America, 79 (6), hal. 1718-1735.
- Faisal, A., 2005, "A Preliminary Investigation of Ground Motion Modeling in Sumatra: A Review". Universite Joseph Fourier. Tidak dipublikasikan.
- Fukushima, Y., dan Tanaka, T., 1990, "A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan," Bulletin of the Seismological Society of America, 80 (4), hal. 757-783.
- Gardner, J.K. dan Knopoff, L., 1974, "Is The Sequence of Earthquakes in Southern California, with Aftershocks Removed, Poissonian?", Bulletin of the Seismological Society of America. 64, hal. 1363-1367.
- Idriss, I.M., 1990, Di dalam Bardet dan Tobita (2001).
- Imai dan Yoshimura, 1990, Di dalam Jafari dkk. (2002).
- Jafari, M.K., Shafiee, A. dan Razmkhah, A., 2002, "Dynamic Properties of Fine Grained Soils in South of Tehran", Journal of Seismology and Earthquake Engineering, 4 (1), hal. 25-35.
- Kertapati, E., 1999, "Probabilistic Estimates of The Seismic Ground Motion Hazard in Indonesia", Prosiding Konferensi Nasional Rekayasa Kempekaan, 4-5 November 1999, Bandung.
- Natawidjaja, D. H., K. Sieh, S. N. Ward, H. Cheng, R. L. Edwards, J. Galetzka, dan B.W. Suwargadi, 2004, "Paleogeodetic Records of Seismic and Aseismic Subduction from Central Sumatra Microatolls, Indonesia", Journal of Geophysical Research, 109, B04306,
- Newcomb, K.R. dan McCann, W.R., 1987, "Seismic History and Seismotectonics of The Sunda Arc". Journal of Geophysical Research, Volume 92, Issue B1, hal. 421-440.
- Petersen, M.D., Dewey, J., Hartzell, S., Mueller, C., Harmsen, S., Frankel, A.D., Rukstales, K., 2004, "Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Sumatra, Indonesia and Across the Southern Malaysian Peninsula", Tectonophysics. 390, hal. 141-158.
- Rodriguez-Marek, A., Bray, J.D., & Abrahamson, N.A., 2001, "An Empirical Geotechnical Seismic Site Response Procedure". Earthquake Spectra. 17(1), hal. 65-87.
- Schnabel, P.B., Lysmer, J., & Seed, H.B., 1972, "SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites. Report no. EERC-72/12. Berkeley: University of California.

- Seed dan Sun, 1989, *Di dalam* Bardet dan Tobita (2001).
- Sieh, K., & Natawidjaja, D., 2000, “*Neotectonics of The Sumatran Fault, Indonesia*”, *Journal of Geophysical Research*, 105 (B12), hal. 28.295-28.326.
- SNI, 2003, “*Standar Nasional Indonesia: Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung*”, SNI-1726-2003. Bandung: Badan Penelitian dan Pengembangan Permukiman dan Prasarana Wilayah.
- Soetardjo, Untung, M., Arnold, E. P., Soetadi, R., Ismail, S., & Kertapati, E. K., 1985, Di dalam “*Series on Seismology, Volume V: Indonesia*”, (Arnold, E.P., ed.), Southeast Asia association of seismology and earthquake engineering (SEASEE). Denver: USGS press.
- Sun, J. dan Pan, T.C., 1995, “*The Probability of Very Large Earthquakes in Sumatra*”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85 (4) hal. 1226-1231.
- USGS, 2005, “*US Geological Surveys-National Earthquake Information Center, Global Database*”, http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html.
- Vucetic, M. and Dobry, R., 1991, “Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 117(1), hal. 89–107.
- Wells, D.L. dan Coppersmith, K.L., 1994, “*New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement*”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 84, hal. 974-1002.
- Youngs, R.R., Chiou, S. J., Silva, W. L. dan Humphrey, J. R., 1997, “*Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes Based on Empirical Data and Numerical Modeling*”, *Seismological Research Letters*, 68 (1), hal. 64-73.
- Zachariassen, J., Sieh, K., Taylor, F.W., Hantoro, W.S., 2000, “*Modern Vertical Deformation Above The Sumatran Subduction Zone: Paleogeodetic Insights from Coral Microatolls*”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, hal. 897– 913.

