

**ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI DENGAN  
PENDEKATAN PROBABILISTIK (*PERFORMANCE-BASED EVALUATION*)  
DI KOTA PADANG, SUMATERA BARAT**

**Rena Misliniyati<sup>1)</sup>, FX Toha<sup>2)</sup>, I Wayan Sengara<sup>3)</sup>**

<sup>1)</sup>Dosen Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik UNIB ,Jl. W.R. Supratman,  
Kandang Limun, Bengkulu 38371, Telp (0736)344087, E-mail : [cik\\_neyna@yahoo.com](mailto:cik_neyna@yahoo.com)

<sup>2),3)</sup>Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan ITB.

***Abstract***

*Evaluation of liquefaction potential by the conventional way are based on deterministic methods. The methods use only one condition of earthquake load as parameter in liquefaction analysis. Actually, the strength of earthquake loads are varies. In the other words, there is the uncertainty magnitude of earthquake loading. The uncertainty can be taken into analysis only by using a probabilistic approach. This study describes how to analyze liquefaction by probabilistic method. The method used was performance-based evaluation, developed by Kramer and Mayfield (2005, 2007). This method include contributions from all levels of magnitude earthquake (hazard levels) in liquefaction analysis. The research location is in Padang, West Sumatra. Soil Investigation data used are N-SPT and shear wave velocity spread in the city of Padang. Earthquake load parameters used were obtained from PSHA and deagregation analysis. The results of this study show the variation of liquefaction potential across the city of Padang based on liquefaction return period. The location with great potential for liquefaction ( $FS_L < 1$ ) by the probability more than 50% were in the coastal region and northern parts of Padang.*

**keywords :** *performance-based evaluation, the probability of liquefaction, liquefaction return period*

**PENDAHULUAN**

Likuifaksi telah menjadi sebuah topik menarik dalam bidang geoteknik sejak dampak kerusakan yang ditimbulkan olehnya pada saat terjadi gempa Niigata (Jepang) dan Alaska pada tahun 1964 (Huang Yi-Min, 2008). Sejak saat itu, penelitian tentang likuifaksi telah dilakukan di banyak negara dan menjadi salah satu bagian penting dalam analisis resiko gempa (*seismic hazard analysis*). Analisis likuifaksi berkembang dari suatu prosedur empiris, dengan model evaluasi deterministik dan probabilistik untuk suatu level spesifik getaran gempa yang terjadi (Kramer dan Mayfield, 2005).

Dalam aplikasinya, tingkat getaran gempa (*ground shaking level*) biasa ditentukan dari hasil PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*). Walaupun pemodelan *ground shaking* ditentukan secara probabilistik,

namun dalam analisis potensi likuifaksi hanya ada satu level *ground shaking* yang dipilih dan digunakan. Padahal dalam kenyataannya, ketika terjadi gempa, suatu lokasi dapat mengalami getaran yang bervariasi dalam rentang *low level* yang sering terjadi hingga ke *high level* yang jarang terjadi. Masing-masing level memiliki potensi yang berbeda untuk memicu terjadinya likuifaksi.

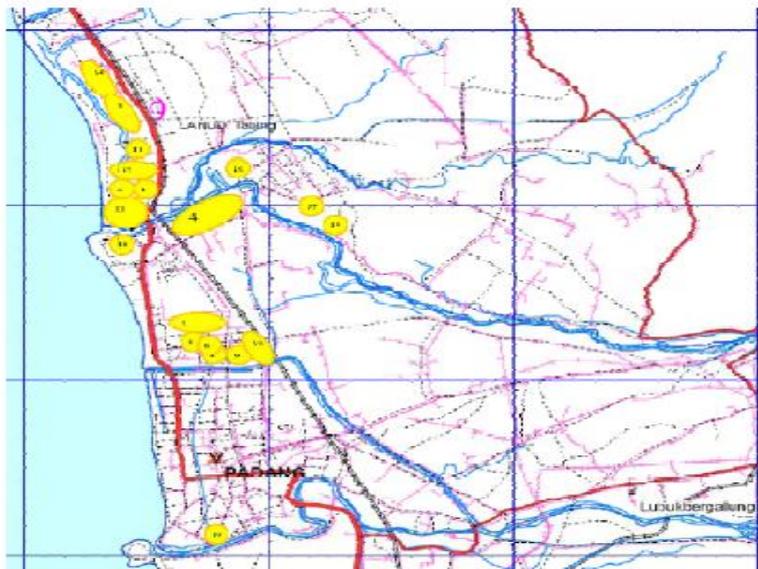
Penelitian yang dilakukan Kramer dan Mayfield (2007) menunjukkan bahwa semua *potential ground shaking* dalam suatu rentang dapat didekati dengan sebuah evaluasi potensi likuifaksi secara probabilistik melalui suatu alur kerja *Performance-based Earthquake Engineering (PBEE)*. Dalam analisisnya, metode *performance-based* memasukkan kontribusi dari semua tingkat resiko (*hazard levels*) dan seluruh nilai magnitude gempa. Hasilnya

adalah estimasi periode ulang likuifaksi, ketimbang hanya sekedar faktor keamanan dan atau besarnya probabilitas terjadinya likuifaksi.

Kota Padang merupakan salah satu kota di pantai barat Pulau Sumatera yang berada pada jalur seismik aktif. Hasil analisis PSHA yang dilakukan oleh Sengara (2009), menunjukkan bahwa nilai percepatan maksimum di batuan dasar (*Peak Base Acceleration*) kota Padang untuk periode ulang 475 tahun adalah sebesar 0.36g. Kejadian gempa yang sering terjadi akhir-akhir ini di kota Padang menyebabkan kota Padang menjadi salah satu daerah pusat kajian gempa di Indonesia. Penelitian yang dilakukan di sana tidak hanya berkaitan dengan analisis resiko gempa saja, namun meluas ke dalam kajian tentang likuifaksi yang juga terjadi ketika adanya gempa.

Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan analisis potensi likuifaksi melalui pendekatan probabilistik dengan metode *Performance-based Evaluation* pada beberapa lokasi di Kota Padang, Sumatera Barat.

Dalam laporan penelitian Sengara, Hakam, dan G. Putra (2009) mengenai hasil survey geoteknik kejadian gempa Kota Padang pada tanggal 30 September 2009, menerangkan bahwa gempa dengan magnitudo  $M_w=7,6$  dengan kedalaman hiposenter 80km, telah menyebabkan terjadinya likuifaksi di beberapa lokasi di Kota Padang. Berdasarkan hasil pengamatan, lokasi terjadinya likuifaksi di Kota Padang ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Lokasi terjadinya likuifaksi yang ditemukan pada saat gempa 30 September 2009 (Sengara dkk., 2009)

Ditinjau dari kondisi geotektonik secara umum, profil tanah Kota Padang didominasi oleh pasir kelanauan dengan konsistensi sedang hingga padat. Untuk area dengan kondisi tanah pasir dengan konsistensi lepas hingga sedang, pada saat gempa dengan getaran kuat terjadi dapat menyebabkan terjadinya likuifaksi pada area tersebut. Berdasarkan analisis potensi likuifaksi yang dilakukan, dimana percepatan maksimum (PBA) yang terjadi sebesar 0.2g dengan

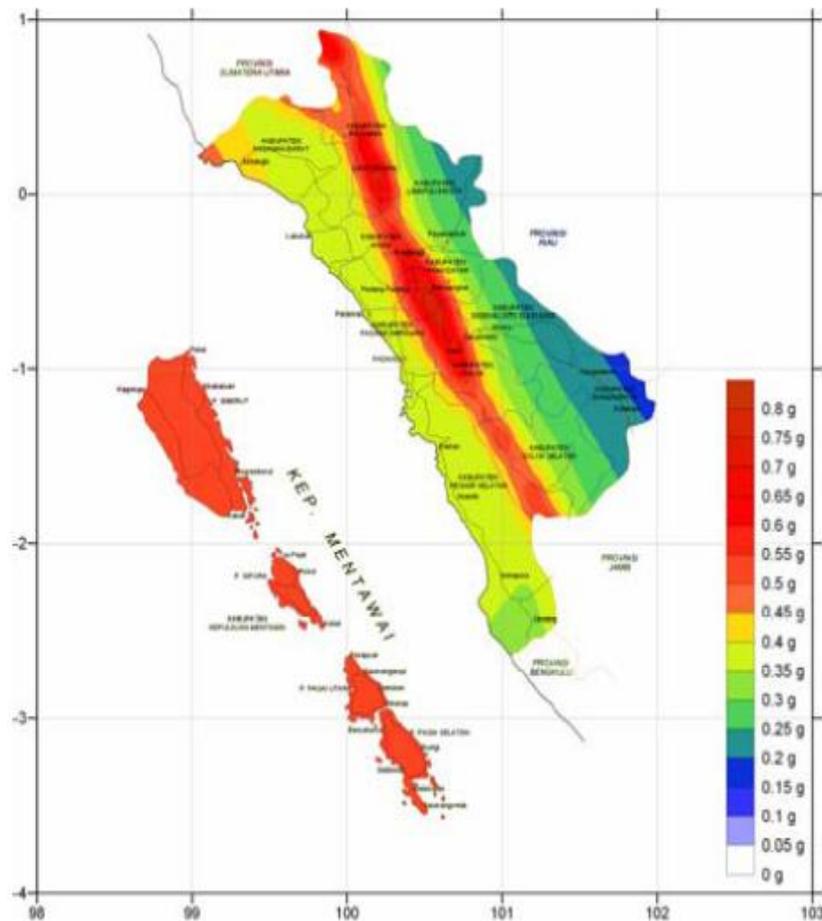
faktor amplifikasi sebesar 1,2g-1,3g dan  $M_w=7,6$ , maka untuk mencegah terjadinya likuifaksi direkomendasikan untuk dilakukan pemadatan diatas 70-80% (tergantung *finest content* (FC) pasir).

Selain itu, dalam penelitiannya yang berjudul *Seismic Hazard Zoning for West Sumatra and Microzonation of City of Padang*, Sengara dkk., (2009) juga melakukan analisis PSHA untuk wilayah Sumatera Barat. Fungsi atenuasi terbaru

digunakan dalam analisis ini, yaitu dengan fungsi eksponensial dan karakteristik model.

Dari hasil PSHA diperoleh nilai percepatan gempa maksimum di batuan dasar (PBA)

untuk periode ulang 475 tahun adalah sebesar 0,36g yang terjadi di sepanjang pesisir wilayah Sumatera Barat.



**Gambar 2.** Peta Zonasi Sumatera Barat, PBA untuk periode ulang 475 tahun(Sengara dkk, 2009)

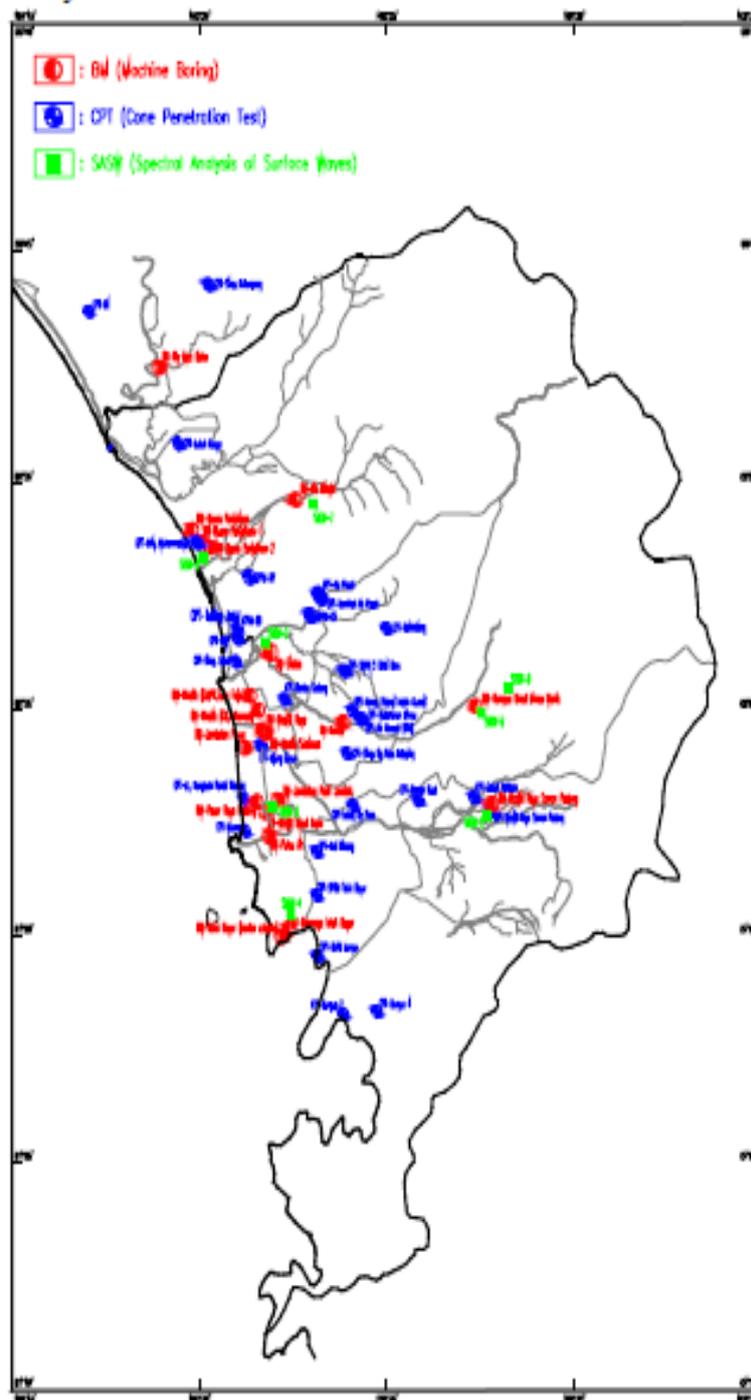
Dalam penelitian ini juga dikembangkan peta mikrozonasi untuk Kota Padang. Peta ini berguna untuk analisis resiko gempa kota Padang. Analisis deagregasi menunjukkan bahwa PBA di sepanjang Kota Padang didominasi oleh subduksi Megathrust Mentawai. Berdasarkan jenis tanah Kota Padang, dimana didominasi oleh pasir kelanauan dengan konsistensi lunak hingga keras, maka faktor amplifikasi yang terjadi sebesar 1,0-1,1.

#### **METODE PENELITIAN**

Dalam penelitian ini dilakukan analisis potensi likuifaksi dengan metode *performance-based evaluation* yang dikembangkan oleh Kramer dan Mayfield pada tahun 2005 dan 2007.

#### **Data penyelidikan tanah**

Dari hasil penyelidikan tanah pada beberapa *site-specific* yang tersebar di kota Padang didapatkan data-data untuk setiap kedalaman berupa nilai N-SPT, distribusi ukuran butir, deskripsi jenis material, dan kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) di setiap kedalaman. Lokasi penyelidikan tanah yang dilakukan, ditunjukkan oleh peta pada Gambar 3.

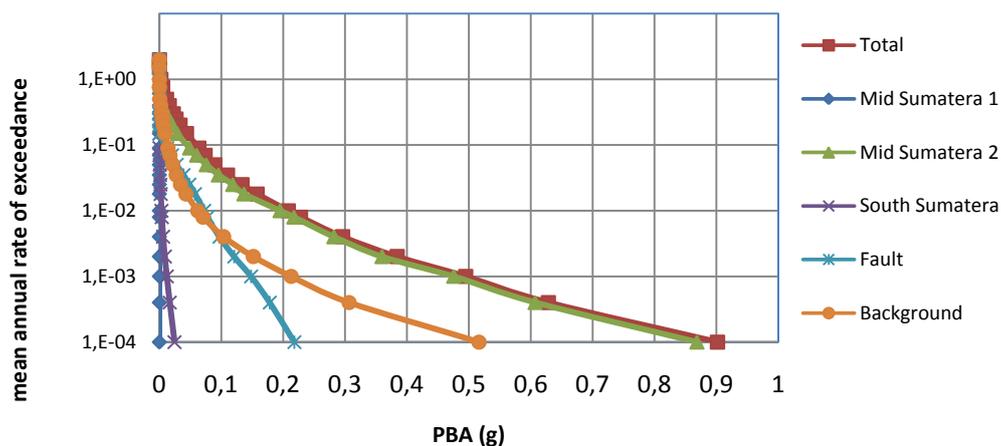


Gambar 3. Lokasi penyelidikan tanah yang dilakukan di Kota Padang (Sengara dkk, 2009)

**Data percepatan maksimum di batuan dasar (PBA).**

Data magnitud dan percepatan gempa yang digunakan dalam penelitian ini didapatkan dari analisis PSHA yang dilakukan Sengara dkk (2009). Selanjutnya, dari hasil analisis deagregasi diketahui bahwa sumber gempa

untuk Kota Padang didominasi oleh subduksi *interface* megathrust Zona Mentawai (Mid Sumatera 2). Sehingga analisis likuifaksi didasarkan pada parameter beban gempa (magnitudo dan percepatan gempa) yang bersumber dari zona subduksi ini.

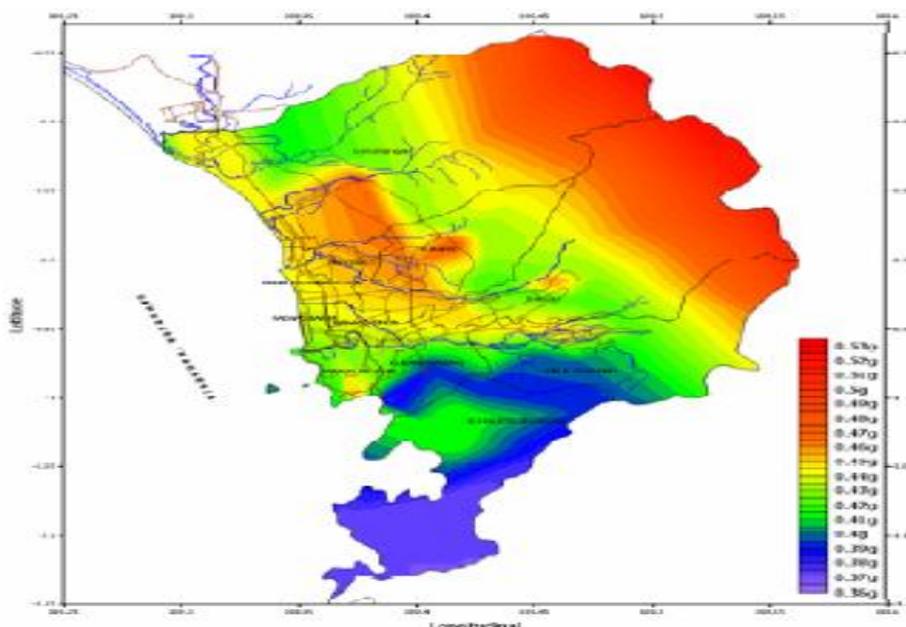


**Gambar 4.** Kurva *Hazard* Gempa untuk subduksi *interface megathrust* Zona Mentawai (Sengara dkk., 2009)

**Data percepatan maksimum di permukaan (PGA).**

Kondisi tanah permukaan kota Padang dapat diklasifikasikan dalam tiga kelas, yaitu *hard soil*, *medium soil*, dan *soft soil*. Masing-masing kelas tanah ini direpresentasikan dengan suatu nilai rata-rata kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ). Perbedaan kondisi tanah ini akan mempengaruhi rambatan gelombang gempa dari batuan dasar ke permukaan.

Percepatan gempa maksimum di permukaan tanah (PGA) didapat dari hasil analisis mikrozonasi Kota Padang yang dilakukan oleh Sengara dkk. (2009). Dari hasil analisis yang dilakukan Sengara dkk. (2009) ini, diketahui bahwa terjadi amplifikasi percepatan gempa dari batuan dasar ke permukaan, dengan faktor amplifikasi berkisar antara 1,1 – 1,3.



**Gambar 5.** Peta Mikrozonasi Seismik Kota Padang (PGA) untuk Periode Ulang 475 tahun (Sengara dkk., 2009)

Dalam penelitian ini, analisis probabilitas likuifaksi dilakukan dengan menggunakan persamaan yang dirumuskan oleh Cetin

(2004), seperti yang direkomendasikan dalam metode *Performance-based*, pada Persamaan 1.

$$P_L = \Phi \left[ -\frac{(N_1)_{60}(1+\theta_1 FC) - \theta_2 \ln CSR_{eq} - \theta_3 \ln M_w - \theta_4 \ln \left( \frac{\sigma'_{vo}}{p_a} \right) + \theta_5 FC + \theta_6}{\sigma_\varepsilon} \right] \quad (1)$$

$$\Lambda_{FS_L^*} = \sum_{j=1}^{N_M} \sum_{i=1}^{N_{a_{max}}} P[FS_L < FS_L^* | a_{max\ i}, m_j] \Delta \lambda_{a_{max\ i}, m_j} \quad (2)$$

$$P[FS_L < FS_L^* | a_{max\ i}, m_j] = \Phi \left[ -\frac{(N_1)_{60}(1+\theta_1 FC) - \theta_2 \ln(CSR_{eq,i} \cdot FS_L^*) - \theta_3 \ln m_j - \theta_4 \ln \left( \frac{\sigma'_{vo}}{p_a} \right) + \theta_5 FC + \theta_6}{\sigma_\varepsilon} \right] \quad (3)$$

$$\lambda_{N_{req}^*} = \sum_{j=1}^{N_M} \sum_{i=1}^{N_{a_{max}}} P[N_{req} > N_{req}^* | a_{max\ i}, m_j] \Delta \lambda_{a_{max\ i}, m_j} \quad (4)$$

$$P[N_{req} > N_{req}^* | a_{max\ i}, m_j] = \Phi \left[ -\frac{N_{req}^* (1+\theta_1 FC) - \theta_2 \ln CSR_{eq,i} - \theta_3 \ln m_j - \theta_4 \ln \left( \frac{\sigma'_{vo}}{p_a} \right) + \theta_5 FC + \theta_6}{\sigma_\varepsilon} \right] \quad (5)$$

**Tabel 1.** Koefisien Cetin et al (2004) dengan dan tanpa estimasi *error*

Case	Measurement/testimation errors	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$	$\sigma_\varepsilon$
I	Included	0,004	13,79	29,06	3,82	0,06	15,25	4,21
II	Removed	0,004	13,32	29,53	3,70	0,05	16,85	2,70

Sumber: Return Period of Soil Liquefaction (Kramer dan Mayfield, 2007)

Selanjutnya dilakukan analisis perhitungan kejadian rata-rata tahunan tak terlampaui untuk faktor keamanan likuifaksi  $FS_L < FS_L^*$  seperti Persamaan 2 dan 3.

Kemudian kejadian rata-rata tahunan terlampaui untuk nilai N-SPT yang dibutuhkan guna mencegah likuifaksi  $N_{req} > N_{req}^*$  dilakukan dengan Persamaan 4 dan 5.

Selanjutnya dilakukan pembuatan kurva hazard likuifaksi dengan *plotting* hasil analisis  $\Lambda_{FS_L^*}$  dan  $\lambda_{N_{req}^*}$  terhadap nilai  $FS_L^*$  dan  $N_{req}^*$  yang telah ditentukan.

## ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, distribusi magnitude gempa yang diasumsikan berpotensi menimbulkan likuifaksi di Kota Padang

adalah magnitude  $M \geq 5,0$  dengan sumber gempa berasal dari zona subduksi *interface megathrust* Mentawai. Kedalaman muka air tanah (*Ground Water Level*) diasumsikan berada tepat di permukaan tanah ( $G_w = -0m$ ) dan analisis potensi likuifaksi dilakukan pada kedalaman 2m, 4m, dan 6m.

### Analisis Parameter Tahanan Tanah (N-SPT)

Parameter N-SPT yang digunakan dalam analisis adalah N-SPT terkoreksi ( $(N_1)_{60}$ ). Gambar (4.1) menampilkan nilai  $(N_1)_{60}$  di tiap kedalaman pada masing-masing lokasi pengeboran.

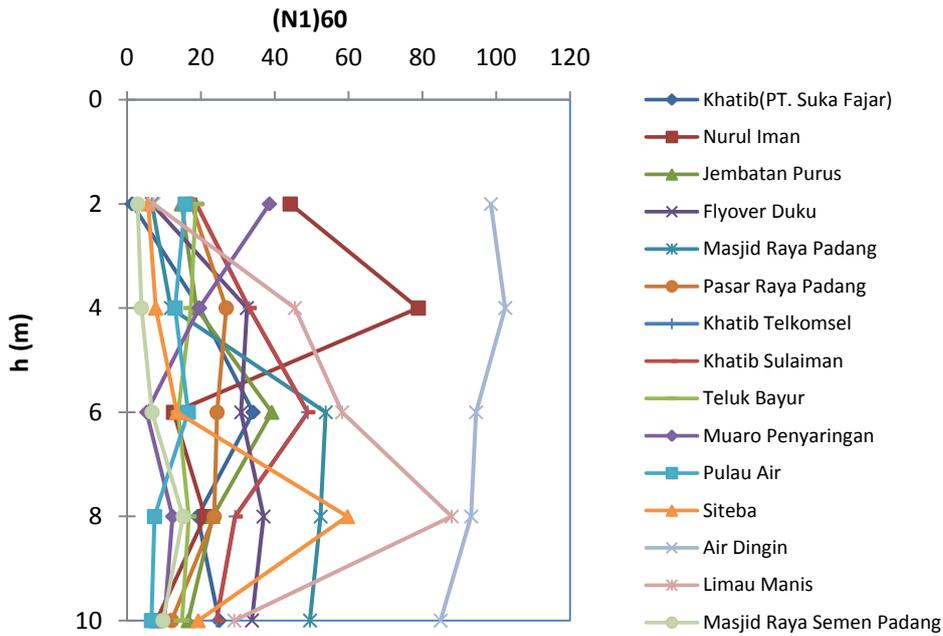
### Analisis Kurva Potensi Likuifaksi

Dalam analisis potensi likuifaksi dengan metode *performance-based*, seluruh tingkat getaran gempa yang direpresentasikan dengan nilai percepatan dari semua kombinasi *magnitude*, dianggap berpotensi

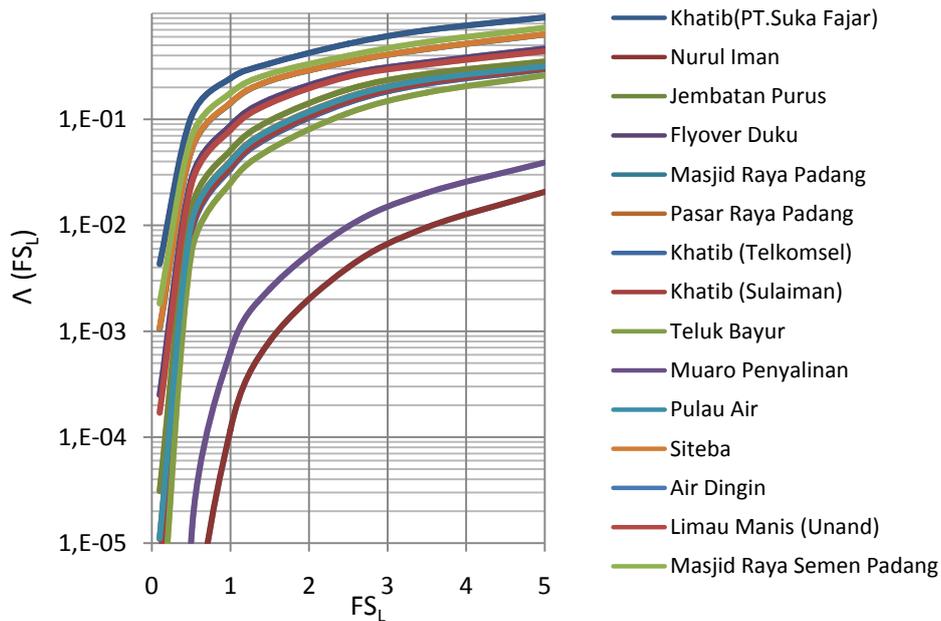
menyebabkan terjadinya likuifaksi. Oleh karena itu, hasil analisis potensi likuifaksi pada lokasi yang ditinjau dapat direpresentasikan dengan suatu kurva yang dinamakan “kurva potensi likuifaksi”.

Kurva ini dibuat setelah sebelumnya dilakukan perhitungan probabilitas faktor keamanan dan nilai N-SPT yang dibutuhkan untuk mencegah terjadinya likuifaksi pada

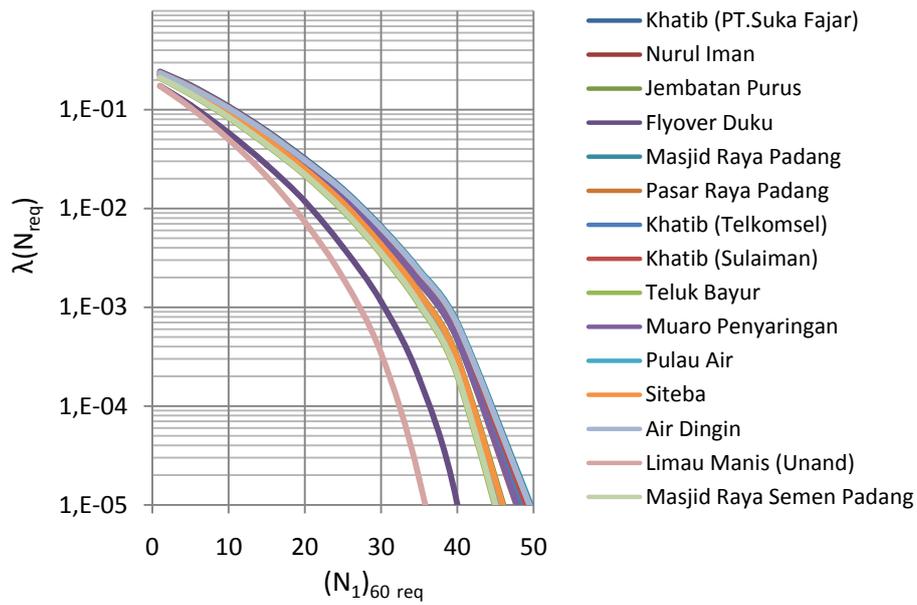
semua lokasi penyelidikan tanah. Perhitungan menggunakan Pers. (1) hingga Pers. (5) sebagaimana yang direkomendasikan dalam metode *performance-based*. Gambar 6. hingga Gambar 9. menampilkan kurva potensi likuifaksi pada kedalaman 2m, 4m, dan 6m di semua lokasi penyelidikan yang tersebar di Kota Padang.



**Gambar 6.** Profil kecepatan gelombang geser di lokasi pengeboran

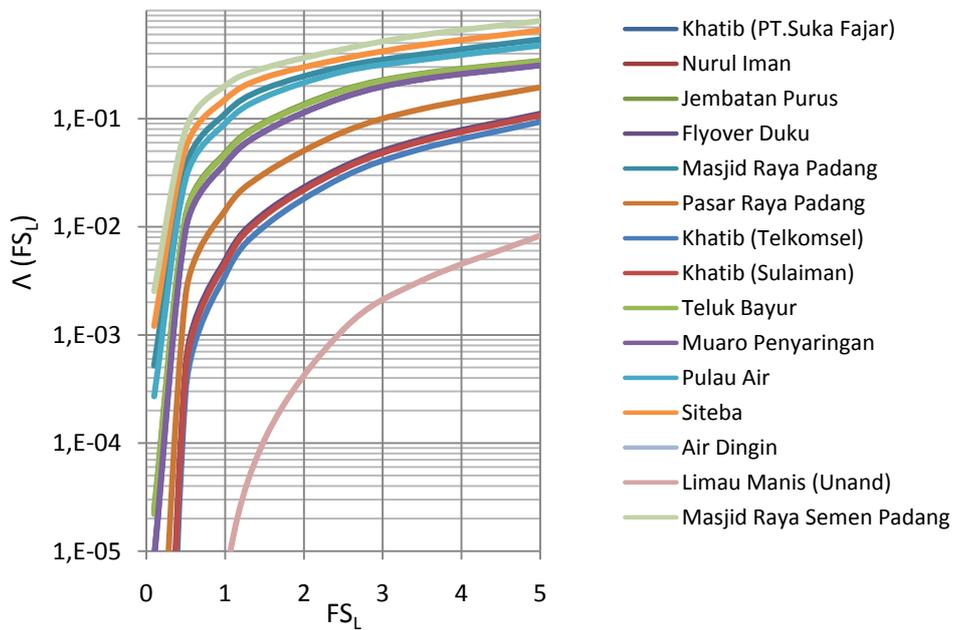


(a)

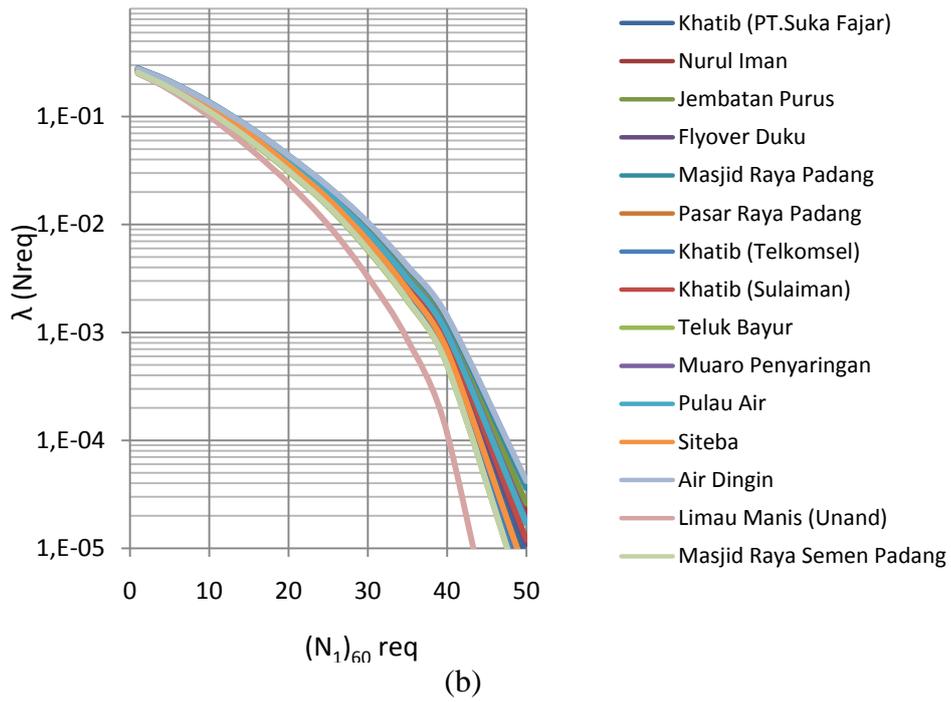


(b)

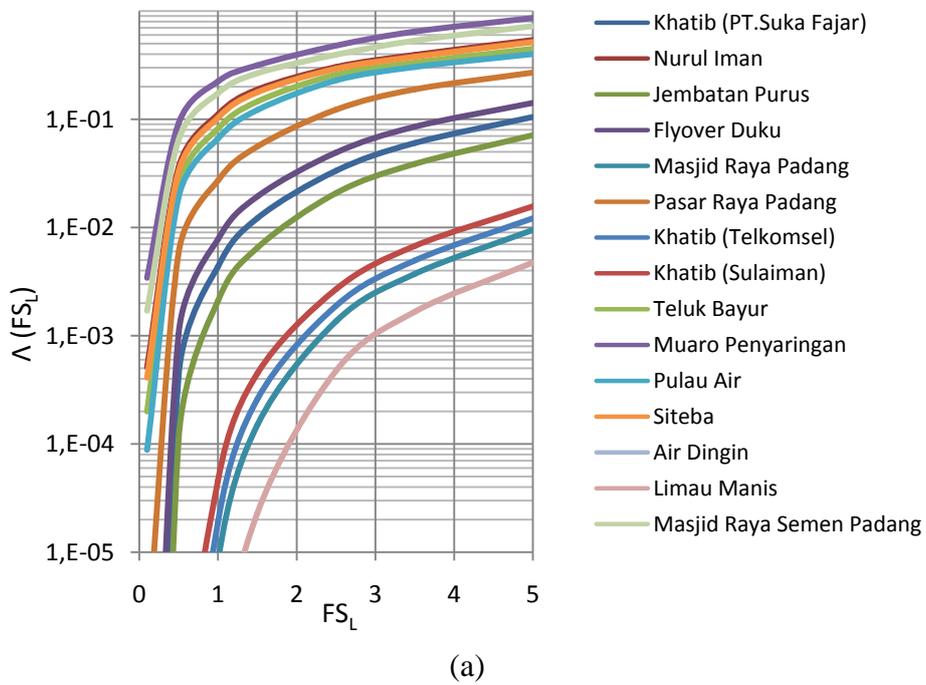
**Gambar 7.** Kurva potensi likuifaksi pada kedalaman 2m  
 (a) Faktor keamanan terhadap likuifaksi ( $FS_L$ )  
 (b)  $N_{\text{req}}$  untuk mencegah terjadinya likuifaksi ( $FS_L=1$ )

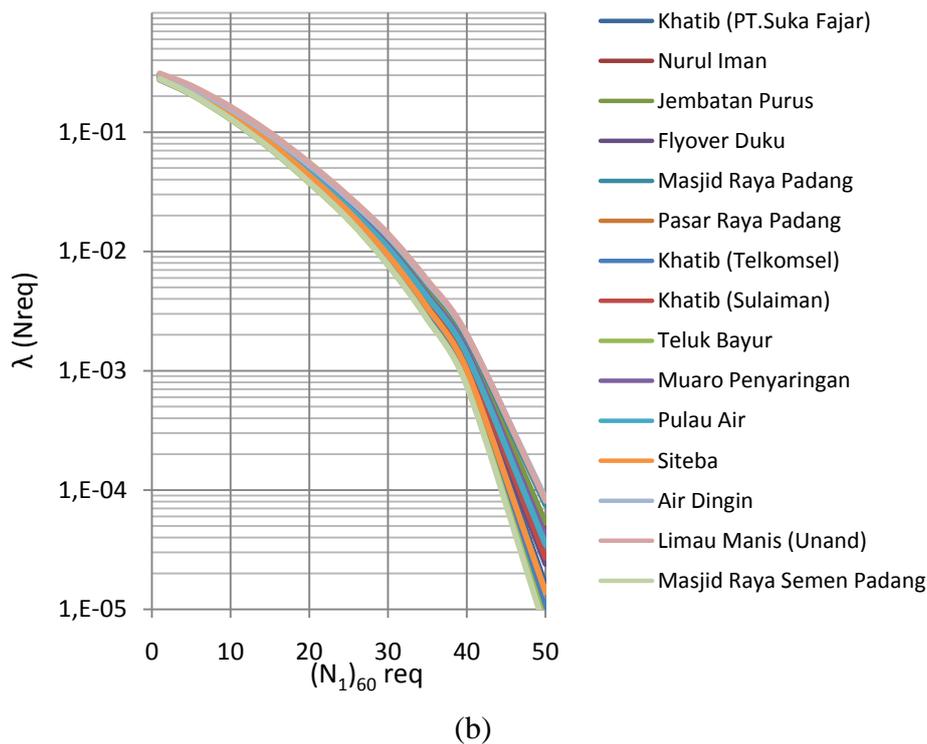


(a)



**Gambar 8.** Kurva potensi likuifaksi pada kedalaman 4m  
 (a) Faktor keamanan terhadap likuifaksi ( $FS_L$ )  
 (b)  $N_{req}$  untuk mencegah terjadinya likuifaksi ( $FS_L=1$ )





**Gambar 9.** Kurva potensi likuifaksi pada kedalaman 6m  
 (a) Faktor keamanan terhadap likuifaksi ( $FS_L$ )  
 (b)  $N_{req}$  untuk mencegah terjadinya likuifaksi ( $FS_L=1$ )

Kurva Potensi likuifaksi yang ditampilkan menunjukkan variasi nilai faktor keamanan dan N-SPT yang dibutuhkan terhadap periode ulang likuifaksi. kurva ini dapat menentukan secara langsung besarnya faktor keamanan terhadap likuifaksi dan N-SPT yang dibutuhkan untuk mencegah likuifaksi di setiap periode ulang yang diberikan. Evaluasi seperti ini tidak mungkin dilakukan dengan metode deterministik. Jika N-SPT terkoreksi yang ditentukan dari hasil investigasi lapangan lebih kecil daripada nilai yang ditentukan dari kurva, maka lokasi tersebut berpotensi terjadi likuifaksi dengan periode ulang sebesar yang ditunjukkan.

Dari kurva potensi likuifaksi untuk  $FS_L$ , terlihat variasi nilai yang cukup beragam. Hal ini menandakan bahwa parameter tahanan insitu (N-SPT) yang dimiliki oleh setiap lokasi bervariasi besarnya. Selain itu, kurva potensi likuifaksi juga menunjukkan adanya variasi nilai N-SPT yang dibutuhkan untuk mencegah likuifaksi ( $N_{req}$ ) di setiap lokasi. Variasi ini terjadi karena adanya perbedaan nilai tahanan tanah yang dimiliki

dan rentang nilai PGA yang tersebar di wilayah Kota Padang.

Untuk periode ulang likuifaksi 475 tahun, diketahui bahwa wilayah yang berpotensi terjadi likuifaksi dengan tingkat probabilitas lebih dari 50% berada pada sepanjang wilayah pesisir dan sebagian wilayah utara Kota Padang.

## KESIMPULAN

Dari hasil analisis potensi likuifaksi Kota Padang dengan metode *performance-based* yang diinterpretasikan dalam bentuk kurva potensi likuifaksi menunjukkan bahwa:

1. wilayah dengan potensi besar terjadi likuifaksi ( $FS_L < 1$ ) berada pada wilayah bagian pesisir dan sebagian wilayah utara Kota Padang dengan tingkat probabilitas lebih dari 50%. Sedangkan Wilayah dengan faktor keamanan lebih dari 1 ( $FS_L > 1$ ) berada di wilayah sebelah timur Kota Padang.
2. Besarnya  $(N_1)_{60}$  yang dibutuhkan untuk mencegah potensi likuifaksi di Kota Padang relatif bervariasi. Seiring

dengan besarnya potensi terjadi likuifaksi, Nilai  $(N_1)_{60,req}$  terbesar pun berada di wilayah pesisir pantai dan sebelah utara Kota Padang.

#### DAFTAR NOTASI

$\Phi$	= standar kumulatif fungsi distribusi normal
$(N_1)_{60}$	= <i>corrected SPT resistance</i>
FC	= <i>Fines Content</i> (dalam persen)
$CSR_{eq}$	= <i>Cyclic Stress Ratio</i>
$M_w$	= momen magnitude
$\sigma'_{vo}$	= <i>initial vertical effective stress</i>
$p_a$	= tekanan atmosfer
$\sigma_\varepsilon$	= ukuran estimasi model dan ketidakpastian parameter (Tabel 1)
$\theta_1 - \theta_6$	= koefisien model yang ditentukan dengan regresi (Tabel 1)
$(\Lambda_{FS_L^*})$	= kejadian rata-rata tahunan tak terlampaui untuk $FS_L < FS_L^*$
$N_M$ dan $N_{a_{max}}$	= jumlah pertambahan magnitude dan percepatan maksimum
$P[FS_L < FS_L^*   a_{max\ i}, m_j]$	= probabilitas kejadian $FS_L < FS_L^*$ dengan variasi $a_{max\ i}, m_j$
$\Delta\lambda_{a_{max\ i}, m_j}$	= pertambahan nilai rata-rata terlampaui pertahun ( <i>rate</i> ) untuk $a_{max\ i}$ dan magnitude ( $m_j$ )
$(\Lambda_{FS_L^*})$	= kejadian rata-rata tahunan terlampaui untuk $N_{req} > N_{req}^*$ ,
$P[N_{req} > N_{req}^*   a_{max\ i}, m_j]$	= probabilitas kejadian $N_{req} > N_{req}^*$ dengan variasi $a_{max\ i}, m_j$

#### DAFTAR PUSTAKA

Cetin, K. O., et al. (2004) : *Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. Journal Geotech. Geoenviron. Eng., 130(12)*, 1314-1340.

Huang Yi-Min. (2008) : *Performance-Based Design and Evaluation for Liquefaction-Related Seismic Hazards*, Disertasi Program Doktor, Washington University, Chapter II, 7.

Kramer, S. L., dan Mayfield, R. T. (2005) : *Performance-based liquefaction hazard evaluation, Proceeding Congress Session of The Geo-Frontiers*, R. W. Boulanger et al., eds., ASCE, Reston, Va.

Kramer, S. L., dan Mayfield, R. T. (2007) : *Return period of soil liquefaction, Journal of Geotech. Geoenviron. Eng., 133(7)*, 802-813.

Sengara, Sadisun, Sumiartha, dkk. (2008) : *Laporan Akhir Zonasi Seismik Sumatera Barat dan Mikrozonasi Kota Padang*, Pusat Mitigasi Bencana Institut Teknologi Bandung.

Sengara, Hakam, G. Putra dkk. (2009) : *Seismic Hazard Zoning for West Sumatera and microzonation of City of Padang, Proceeding of the international symposium on Geoinformatics and Zoning for Hazard Mapping in Kyoto, Kyoto, Japan.*

Sengara, Hakam, G. Putra dkk. (2009) : *Reconnaissance Survey and Geotechnical Engineering Aspect of West Java and West Sumatera Earthquake Disaster*, Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan XIII 2009, Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia, halaman **K-14**. Denpasar, Bali.

