

Studi Keandalan Metode Analisis Likuifaksi Menggunakan SPT Akibat Gempa 8,6 M_w , 12 September 2007 di Area Pesisir Kota Bengkulu

Lindung Zalbuin Mase

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Bengkulu
Jalan. WR. Supratman No.2, Kandang Limun 38371, Muara Bangkahulu, Kota Bengkulu
E-mail: lmase@unib.ac.id

Abstrak

Naskah ini menyajikan hasil studi potensi likuifaksi di kawasan pesisir Kota Bengkulu, berdasarkan gempa berkekuatan 8,4 M_w , yang terjadi pada 12 September 2007 silam. Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis potensi likuifaksi berdasarkan data SPT menggunakan metode empiris yang paling sesuai dari beberapa metode empiris yang lazim digunakan. Untuk memperoleh metode analisis yang paling sesuai, dilakukanlah perbandingan hasil analisis dengan data kejadian likuifaksi di lapangan. Metode yang paling sesuai adalah metode yang memiliki nilai faktor bobot kesalahan terendah. Metode tersebut selanjutnya digunakan untuk menentukan faktor keamanan likuifaksi nilai probabilitas likuifaksi (P_L). Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa Metode Idriss-Boulanger merupakan metode yang paling mendekati dalam mengestimasi kesesuaian prediksi dan kejadian di lapangan. Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode tersebut, likuifaksi sangat berpotensi terjadi pada area yang diteliti. Kondisi kritis likuifaksi (faktor aman sama dengan 1) dapat terjadi dengan nilai probabilitas sebesar 0,495 khususnya pada tanah pasir sedang sampai dengan padat.

Kata-kata Kunci: likuifaksi, gempa, faktor keamanan, probabilitas

Abstract

This paper presents a study of liquefaction potential in coastal area of Bengkulu City caused during the 8.4 M_w earthquake event on 12 September 2007. To determine the most suitable method, all methods are compared with the liquefaction event data, by fitting concept. The most suitable method was selected as the smallest error weighted factor. The suitable method is then used to determine factor of safety (FS) against liquefaction and probability of liquefaction (P_L). The result shows that the suitable method in estimating the suitability of prediction and field data is Idriss-Boulanger method. In general, Liquefaction could occur at the investigated area. The critical condition of liquefaction could happen with P_L of 0.495, especially medium-dense sands.

Keywords: liquefaction, earthquake, factor of safety, probability

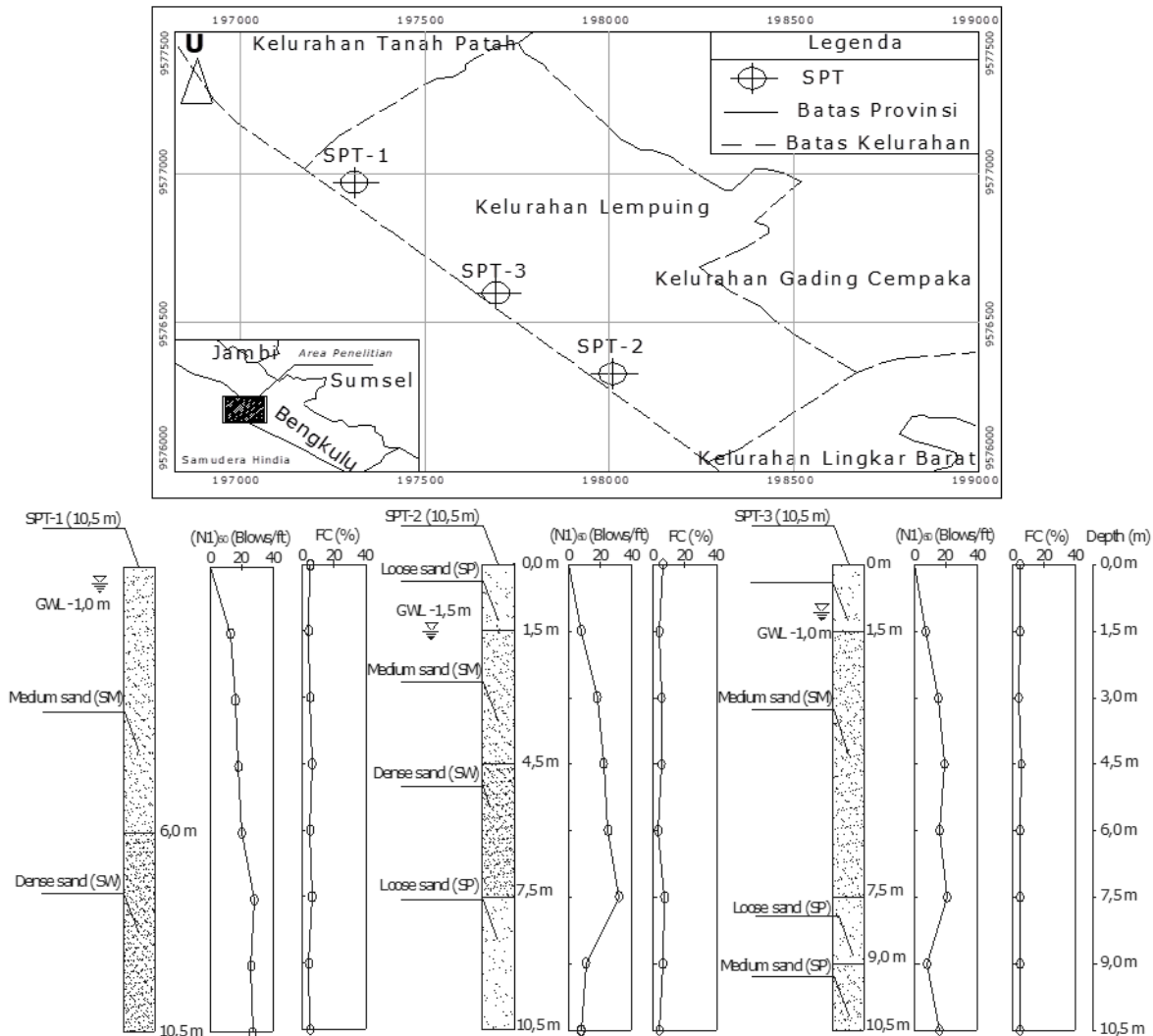
1. Pendahuluan

Pada tanggal 12 September 2007, sebuah gempa berkekuatan 8,4 M_w mengguncang Bengkulu (BMKG, 2010). Gempa ini tercatat sebagai salah satu gempa terdahsyat yang terjadi di Bengkulu dalam satu dekade terakhir serta memicu terjadinya likuifaksi, yang ditandai dengan adanya *sand boils*, *lateral spreads*, dan *ground subsidence* di pesisir Kota Bengkulu. Salah satu daerah yang mengalami kejadian likuifaksi adalah Lempuing. Beberapa peneliti lokal telah melakukan studi potensi likuifaksi di Lempuing, di antaranya Misliniyati dkk. (2013), Mase dan Sari (2015), serta Mase dan Somantri (2016). Secara umum studi terdahulu difokuskan pada estimasi atau perkiraan faktor keamanan (FS) dan probabilitas likuifaksi (P_L) menggunakan metode-metode empiris yang pernah diusulkan. Meskipun demikian, penggunaan metode analisis yang sesuai diterapkan dalam identifikasi likuifaksi di Bengkulu masih belum dilakukan. Penelitian ini menyajikan analisis potensi likuifaksi berdasarkan metode yang sesuai dengan membandingkan kejadian likuifaksi yang ditemukan di lokasi penelitian. Metode yang paling mendekati keadaan lapangan digunakan untuk memprediksi

nilai faktor keamanan dan probabilitas likuifaksi. Nilai probabilitas dan SPT (*standard penetration test*) kritis juga diestimasi dalam studi ini. Studi ini dapat memberikan pemahaman yang baik dalam menganalisis potensi likuifaksi di pesisir Bengkulu.

2. Lokasi Studi dan Kondisi Geologi

Lokasi studi adalah Lempuing, suatu area di pesisir Kota Bengkulu (**Gambar 1a**). Tiga titik investigasi kedalaman 10 m (**Gambar 1b**), diinvestigasi di wilayah ini. Secara umum, perlapisan tanah di kawasan Lempuing didominasi oleh tanah kepasiran. Pasir dengan kepadatan lepas (SP) ditemukan pada rentang kedalaman 0 sampai dengan 1,5. Lapisan tanah didominasi dengan pasir sedang (SP) ditemukan sampai dengan kedalaman 7,5 m, Pasir padat (SP) ditemukan pada kedalaman 4,5 sampai 7,5 m dan 6 m sampai dengan 10 m. Muka air tanah pada lokasi ini ditemukan pada kedalaman 0-0,5 m. Berdasarkan interpretasi perlapisan tanah, pasir jenuh dengan kepadatan lepas sampai sedang diprediksi sebagai perlapisan rentan terlikuifaksi.



Gambar 1. Layout area studi dan kondisi perlapisan tanah

3. Studi Pustaka

3.1 Metode analisis potensi likuifaksi berdasarkan data SPT

1. Metode Seed

Metode ini dimodifikasi oleh Seed dkk. (1985). Dalam penggunaan metode ini, besaran CSR (*Cyclic Stress Ratio*) dan CRR (*Cyclic Resistance Ratio*) ditentukan dari parameter kekuatan gempa (M_w), PGA, FC, dan tegangan efektif tanah (s_v'). Detail alur analisis disajikan pada Gambar 2.

2. Metode Tokimatsu-Yoshimi

Tokimatsu dan Yoshimi (1983) mengusulkan metode analisis potensi likuifaksi yang mirip dengan Metode Seed. Metode ini mempertimbangkan level kerentanan likuifaksi yang dinyatakan sebagai koefisien C_s . Menurut Chang dkk. (2011), nilai C_s yang digunakan umumnya berada dalam rentang 80-90. Nilai $C_s=75$ digunakan untuk kejadian likuifaksi berat. Bagan alir metode ini dapat dilihat pada Gambar 3.

3. Metode JRA (*Japan Rail Association*)

Pada metode JRA (1996) nilai CRR dianalisis dengan menggunakan faktor c_w yang diperoleh berdasarkan mekanisme gempa yang terjadi, yakni gempa (EQ) tipe I atau tipe II. Tipe I khusus gempa akibat aktifitas subduksi, sedangkan Tipe II untuk intraplat benua. Tahapan analisis menggunakan metode ini dapat dilihat pada Gambar 4.

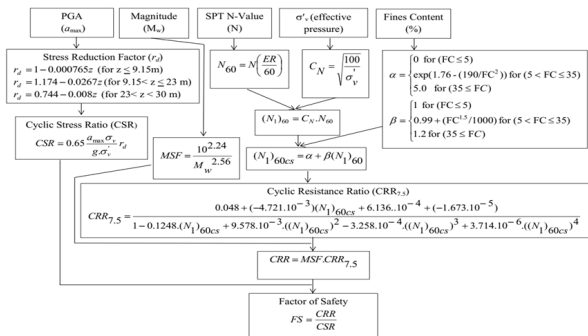
4. Metode Youd-Idriss

Youd dan Idriss (2001) mengusulkan metode analisis potensi likuifaksi. CSR, r_d (faktor reduksi kedalaman) ditentukan berdasarkan rentang kedalaman. Nilai CRR ditentukan dari besarnya nilai SPT yang dikoreksi berdasarkan nilai FC ($(N_1)_{60cs}$). Alur analisis menggunakan metode ini disajikan pada Gambar 5.

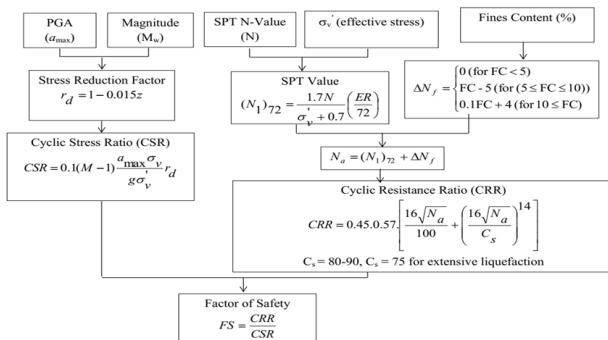
5. Metode Idriss-Boulanger

Idriss and Boulanger (2008) mengusulkan metode analisis semi empiris likuifaksi akibat gempa. Metode ini menggunakan FC dan SPT terkoreksi

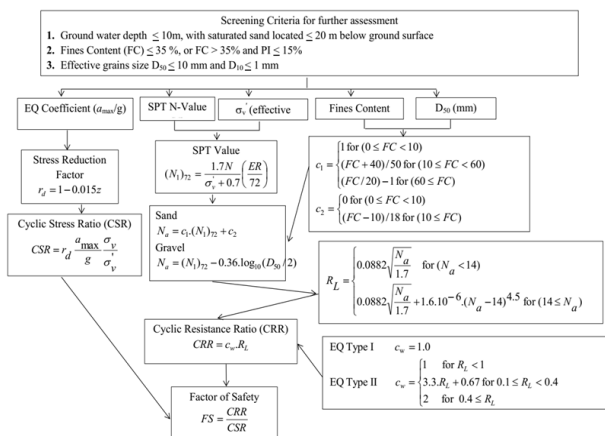
$(N_1)_{60cs}$ dalam perhitungan CRR. Metode ini juga menggunakan koreksi tekanan overburden (K_s). Bagan alir metode ini disajikan pada Gambar 6.



Gambar 2. Bagan alir Metode Seed (Seed dkk., 1985)



Gambar 3. Bagan alir Metode Tokimatsu-Yoshimi (Tokimatsu dan Yoshimi, 1983)



Gambar 4. Bagan alir Metode JRA (JRA, 1996)

3.2 Pendekatan empiris probabilitas likuifaksi

Beberapa pendekatan empiris untuk menentukan probabilitas likuifaksi berdasarkan nilai FS telah diusulkan banyak peneliti, di antaranya sebagai berikut

- Hwang dkk. (2004)

$$P_L = 1 - \phi\left(-0.013 + \frac{\ln(FS)}{0.7758}\right) \quad (1)$$

- Somnez dan Gokceoglu (2005)

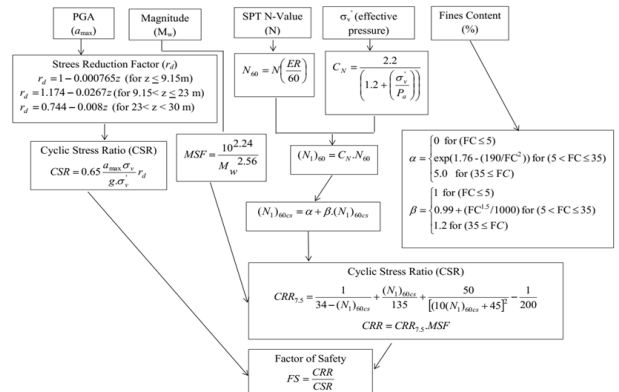
$$P_L = \frac{1}{1 + \left(\frac{FS}{0.96}\right)^{4.5}} \quad (2)$$

- Lai dkk. (2006)

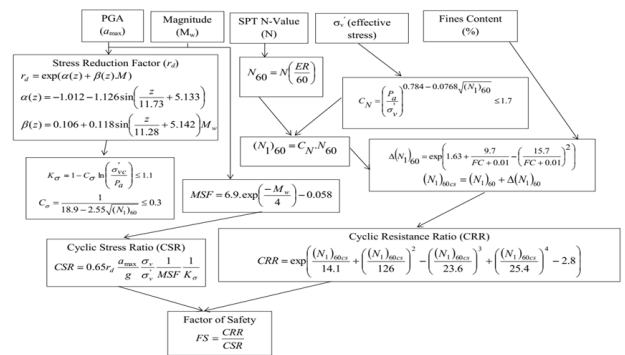
$$P_L = \frac{1}{1 + 0.2(FS)^3 + 0.8(FS)^7} \quad (3)$$

- Juang dkk. (2008)

$$P_L = \frac{1}{1 + \left(\frac{FS}{1.05}\right)^{3.8}} \quad (4)$$



Gambar 5. Bagan alir Metode Youd-Idriss (Youd dan Idriss, 2001)



Gambar 6. Bagan alir Metode Idriss-Boulanger (Idriss dan Boulanger, 2008)

4. Metode Penelitian

Uji SPT dan pengumpulan nilai rasio tegangan siklik laboratorium (CSR_{lab}) dilakukan sampai dengan 10 m pada area terlikuifaksi. Informasi kedalaman terdampak diperoleh dari studi Mase dan Somantri (2016). CSR_{lab} dikonversi menjadi CSR lapangan (CSR_{lap}) dengan persamaan berikut,

$$CSR_{lap} = c_r \cdot CSR_{lab} \quad (5)$$

dimana c_r adalah faktor konversi CSR laboratorium-lapangan yang diprediksi pada Gambar 7.

Data CSR_{lap} selanjutnya diinterpretasikan ke dalam grafik CRR/CCR dan $(N_1)_{60}$ seperti pada Gambar 8, untuk membedakan zona terlikuifaksi/tidak. Prediksi benar apabila kejadian di lapangan dan hasil interpretasi perbandingan CSR dan CRR sejalan. Pada Gambar 8, diketahui bahwa likuifaksi di lapangan terjadi pada titik A dimana $CSR > CRR$ grafik. Ini berarti prediksi dan

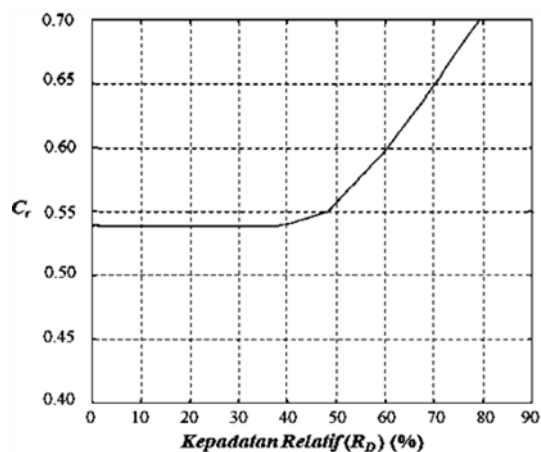
kejadian di lapangan adalah sejalan dan sebaliknya titik B. Nilai *error* (Chang dkk., 2011) kejadian likuifaksi berdasarkan nilai $CRR_{prediksi}$ dan $CSR_{lapangan}$ dihitung menggunakan Persamaan 6. Prediksi bernilai salah jika prediksi dan kejadian di lapangan tidak bersesuaian.

$$e_{Liq} = \frac{ABS(CSR_{lapangan} - CRR_{prediksi})}{CRR_{prediksi}} \quad (6)$$

Nilai *error* selanjutnya dihitung nilai rata-ratanya. Sementara itu, jumlah kejadian yang sesuai dan tidak sesuai dengan prediksi dihitung nilai kesesuaiannya (P_{error}) menggunakan Persamaan 7. Selanjutnya *error* rata-rata ($e_{liq(ave)}$) dan P_{error} dianalisis untuk memperoleh nilai bobot keandalan (W_f) metode menggunakan Persamaan 8 (diturunkan dari studi Chang dkk. (2011)). Metode dengan W_f terkecil dianggap sebagai metode yang paling handal dalam analisis likuifaksi. Selanjutnya faktor keamanan likuifaksi dan probabilitasnya dianalisis menggunakan metode yang paling handal. Dari hasil analisis, nilai probabilitas kritis (saat FS=1) dan nilai $(N_1)_{60}$ kritis dapat ditentukan.

$$P_{error} = \frac{\text{jumlah prediksi likuifaksi yang tidak sesuai dengan kejadian lapangan}}{\text{jumlah total kejadian yang ditinjau}} \quad (7)$$

$$W_f = P_{error} \cdot e_{liq(ave)} \cdot 100 \quad (8)$$

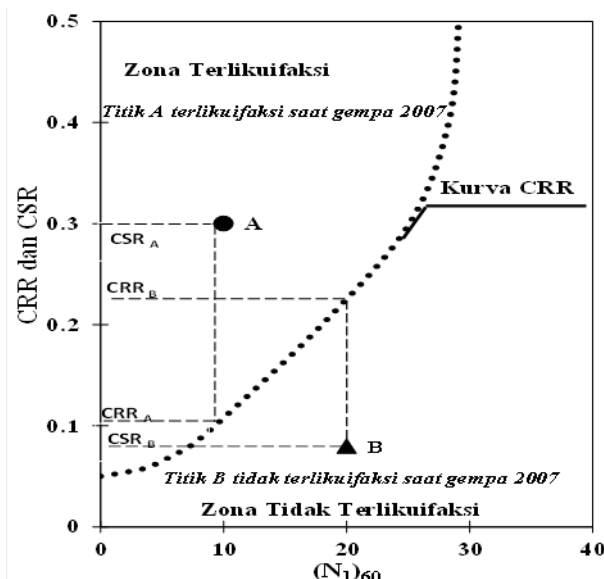


Gambar 7. Variasi nilai C_r terhadap kepadatan relatif (dimodifikasi dari Das dan Ramana, 2010)

5. Hasil dan Pembahasan

5.1 Perbandingan hasil prediksi kejadian likuifaksi dan kejadian aktual di lapangan

Pada Tabel 1, kejadian likuifaksi terindikasi pada kedalaman 1 sampai 7,5 m dan 9 sampai 10 m. Nilai $(N_1)_{60}$ pada kedalaman tersebut memiliki rentang 7-20 blows/ft (pukulan per 30 cm). Nilai CSR_{lap} (Tabel 1) diplotkan pada grafik CRR metode-metode seperti pada Gambar 9. Secara umum, Metode Seed memprediksi bahwa pada setiap titik kedalaman yang dianalisis terindikasi berpotensi mengalami likuifaksi. Metode Tokimatsu-Yoshimi, Youd-Idriss, dan Idriss-Boulanger memprediksi bahwa tidak terjadi likuifaksi pada pasir dengan $(N_1)_{60} \geq 27$ blows/ft. Metode JRA memprediksi bahwa titik kedalaman yang memiliki nilai

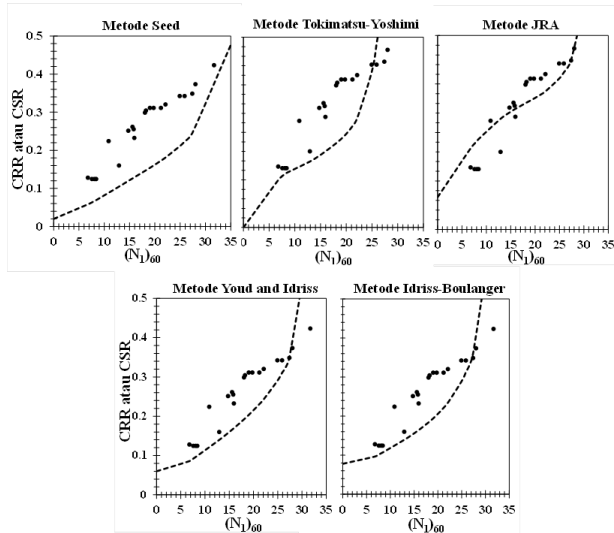


Gambar 8. Variasi nilai C_r terhadap kepadatan relatif (dimodifikasi dari Das dan Ramana, 2010)

$(N_1)_{60}$ 7-15 blows/ft tidak terindikasi likuifaksi karena $CRR_{prediksi} \geq CSR_{lap}$. Hasil analisis nilai error antara kejadian dilapangan dan prediksi disajikan pada Tabel 2. Metode JRA memberikan nilai error rata-rata ($e_{liq(ave)}$) yang paling kecil dibandingkan dengan metode-metode. Metode Seed merupakan metode dengan nilai error rata-rata yang paling besar di antara metode-metode lainnya. Interpretasi kesesuaian kejadian likuifaksi dapat dilihat pada Tabel 3. Berdasarkan hasil analisis kesesuaian kejadian lapangan dan prediksi, terlihat bahwa Metode JRA memiliki jumlah prediksi yang tidak akurat sebanyak 11 kejadian, dengan nilai kesesuaian (P_{error}), sedangkan Metode Tokimatsu-Yoshimi merupakan metode yang paling akurat dalam memprediksi kesesuaian kejadian di lapangan. Hasil analisis faktor bobot kesalahan atau *error weighted factor* dapat dilihat pada Tabel 4. Metode Seed memiliki faktor bobot kesalahan tertinggi di antara metode lainnya. Metode dengan nilai faktor bobot terkecil berdasarkan hasil analisis adalah Metode Idriss-Boulanger. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa Metode Idriss-Boulanger adalah metode yang paling handal dalam memprediksi likuifaksi September 2007.

5.2 Faktor aman dan probabilitas likuifaksi

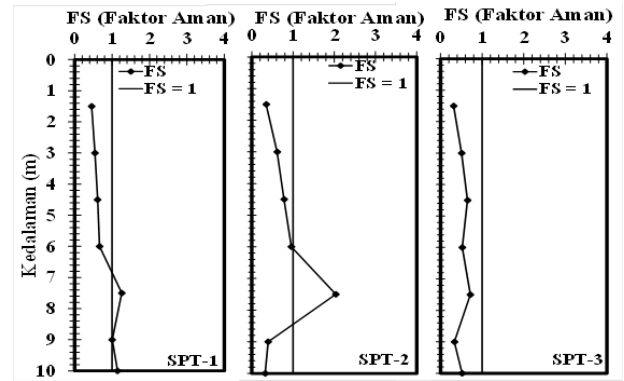
Gambar 10 merupakan interpretasi dari faktor aman menggunakan Metode Idriss-Boulanger. Secara umum, likuifaksi berpotensi terjadi sampai pada seluruh kedalaman. Likuifaksi juga ditemukan pada kedalaman 0-7 m (SPT-1), 0-6 m dan 8,5-10 m (SPT-2). Nilai FS selanjutnya dianalisis nilai probabilitas likuifaksinya, seperti terlihat pada Gambar 10. Dari hasil analisis probabilitas likuifaksi, terlihat bahwa nilai probabilitas likuifaksi untuk keadaan kritis rata-rata bernilai 0,495. Nilai probabilitas likuifaksi juga diinterpretasikan terhadap $(N_1)_{60}$ pada Gambar 11. Terlihat bahwa perlapisan tanah dengan $(N_1)_{60}$ sebesar 25-27 blows/ft merupakan jenis tanah kritis likuifaksi (pasir sedang-padat).



Gambar 9. Interpretasi CSR lapangan pada area yang diteliti dan kurva CRR dari beberapa metode

Tabel 1. Nilai $(N_1)_{60}$, FC (fraksi halus), dan CSR_{lap} pada tiap kedalaman investigasi

SPT	Kedalaman (m)	$(N_1)_{60}$ (blows/ft)	FC (%)	CSR_{lap}	Pengamatan Lapangan
SPT-1	1.5	13	4.0	0.16	Terlikuifaksi
	3.0	16	5.0	0.23	Terlikuifaksi
	4.5	18	5.0	0.30	Terlikuifaksi
	6.0	20	5.0	0.31	Terlikuifaksi
	7.5	28	4.5	0.37	Tidak Terlikuifaksi
	9.0	26	4.0	0.34	Tidak Terlikuifaksi
10.0	27	5.0	0.35	Tidak Terlikuifaksi	
SPT-2	1.5	8	4.0	0.12	Terlikuifaksi
	3.0	18	5.0	0.30	Terlikuifaksi
	4.5	22	5.0	0.32	Tidak Terlikuifaksi
	6.0	25	3.0	0.34	Tidak Terlikuifaksi
	7.5	32	4.8	0.42	Tidak Terlikuifaksi
	9.0	11	5.0	0.22	Terlikuifaksi
10.0	8	4.0	0.12	Terlikuifaksi	
SPT-3	1.5	7	5.0	0.13	Terlikuifaksi
	3.0	15	4.0	0.25	Terlikuifaksi
	4.5	19	4.6	0.31	Terlikuifaksi
	6.0	16	5.0	0.26	Terlikuifaksi
	7.5	21	5.0	0.31	Tidak Terlikuifaksi
	9.0	8	5.0	0.12	Terlikuifaksi
10.0	16	5.0	0.26	Terlikuifaksi	



Gambar 10. Interpretasi faktor aman likuifaksi terhadap kedalaman (a) SPT-1, (b) SPT-2, and (c) SPT-3

Tabel 2. Hasil analisis nilai error dari data lapangan dan prediksi

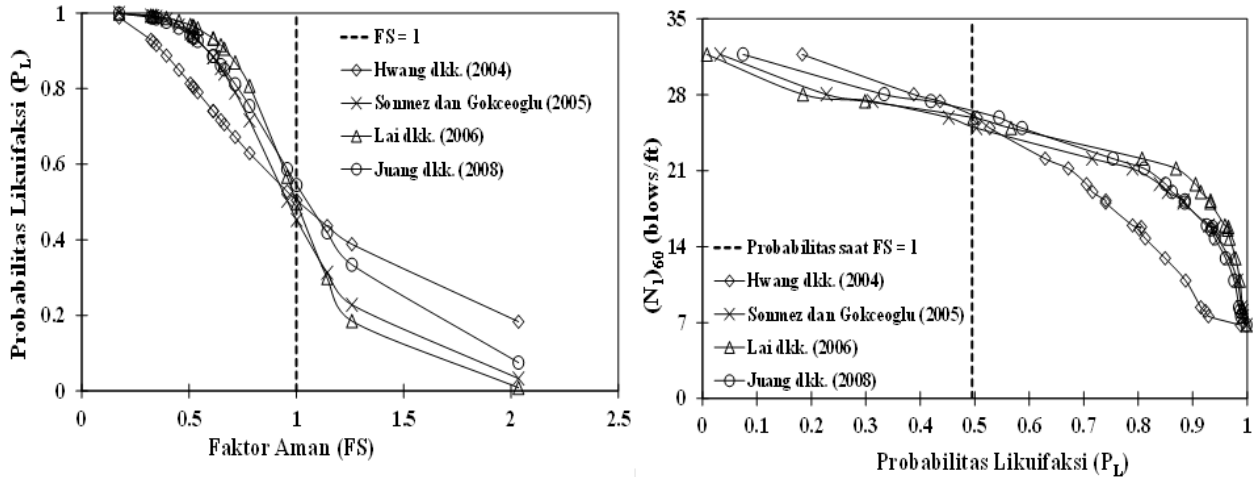
SPT	Kedalaman (m)	Nilai Error				
		Seed	Tokimatsu-Yoshimi	JRA	Youd-Idriss	Idriss-Boulanger
SPT-1	1.5	0.344	0.133	0.429	0.125	0.128
	3.0	0.444	0.312	0.071	0.270	0.293
	4.5	0.511	0.434	0.141	0.356	0.384
	6.0	0.485	0.376	0.132	0.317	0.348
	7.5	0.314	0.446	0.052	0.008	0.030
	9.0	0.348	0.132	0.053	0.092	0.086
10.0	0.297	0.513	0.005	0.004	0.034	
SPT-2	1.5	0.444	0.079	0.498	0.202	0.139
	3.0	0.515	0.411	0.140	0.360	0.388
	4.5	0.435	0.283	0.111	0.240	0.267
	6.0	0.384	0.046	0.091	0.152	0.158
	7.5	0.273	1.420	0.077	0.575	0.455
	9.0	0.606	0.454	0.104	0.461	0.446
10.0	0.490	0.129	0.423	0.258	0.182	
SPT-3	1.5	0.544	0.221	0.310	0.329	0.244
	3.0	0.524	0.399	0.039	0.373	0.387
	4.5	0.505	0.424	0.153	0.346	0.375
	6.0	0.517	0.399	0.057	0.366	0.384
	7.5	0.445	0.315	0.105	0.258	0.289
	9.0	0.464	0.098	0.467	0.226	0.157
10.0	0.498	0.377	0.028	0.341	0.361	
Rata-rata error (e_{avg})		0.447	0.352	0.166	0.270	0.264

Tabel 4. Faktor bobot metode-metode yang digunakan dalam analisis

Item	Metode yang digunakan				
	Seed	Tokimatsu-Yoshimi	JRA	Youd-Idriss	Idriss-Boulanger
e_{avg} (Nilai Error)	0.447	0.352	0.166	0.270	0.264
P_{avg} (Nilai Kesesuaian)	0.333	0.143	0.524	0.238	0.190
W_j (Faktor Bobot Kesalahan)	14.902	5.036	8.689	6.418	5.021

Tabel 3. Analisis hasil kesesuaian kejadian lapangan dengan prediksi

SPT	Kedalaman (m)	Kejadian Lapangan (M uktadir, 2013)	Hasil Prediksi Berdasarkan Plot Grafik				
			Seed	Tokimatsu-Yoshimi	JRA	Youd-Idriss	Idriss-Boulanger
SPT-1	1.5	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Tidak Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi
	3	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Tidak Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi
	4.5	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi
	6	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi
	7.5	Tidak Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Tidak Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Tidak Terlikuifaksi
	9	Tidak Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Tidak Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi
10	Tidak Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Tidak Terlikuifaksi	Tidak Terlikuifaksi	Tidak Terlikuifaksi	Tidak Terlikuifaksi	
SPT-2	1.5	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Tidak Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi
	3	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi
	4.5	Tidak Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi
	6	Tidak Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi
	7.5	Tidak Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Tidak Terlikuifaksi	Tidak Terlikuifaksi	Tidak Terlikuifaksi	Tidak Terlikuifaksi
	9	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi
10	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Tidak Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	
SPT-3	1.5	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Tidak Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi
	3	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi
	4.5	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi
	6	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi
	7.5	Tidak Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi
	9	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Tidak Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi
10	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	Terlikuifaksi	
Jumlah prediksi yang tidak sesuai kejadian			7	3	11	5	4
P_{error}			0.333	0.143	0.524	0.238	0.190



Gambar 11. Analisis potensi likuifaksi dalam memprediksi probabilitas likuifaksi kritis dan $(N_1)_{60}$ kritis

6. Kesimpulan

Metode Idriss-Boulanger adalah metode yang paling mendekati kejadian likuifaksi yang di lapangan yang ditemui pasca Gempa September 2007. Secara umum, kondisi peralihan tanah di Lempuing sangat berpotensi mengalami likuifaksi, dengan nilai estimasi probabilitas kritis sebesar 0,495. Jenis pasir dengan kepadatan sedang sampai padat dapat mengalami keadaan kritis akibat gempa 2007.

7. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Mekanika Tanah, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Bengkulu, beserta staf, untuk data SPT dan CSR_{lab} yang digunakan dalam studi ini.

Daftar Pustaka

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), 2010, *Data Kejadian Gempa di Bengkulu rentang 2000-2009*, BMKG, Bengkulu, Indonesia.

Chang, M., Kuo, C.P., Shau, S.H., dan Hsu, R.E., 2011, Comparison of SPT-N-Based Analysis Methods in Evaluation of Liquefaction Potential During the 1999 Chi-Chi Earthquake in Taiwan, *Computers and Geotechnics*, Vol. 38, No.3, 393-406.

Das, B.M, and Ramana, G.V., 2010, *Principles of Soil Dynamics*, Second Edition, Cengage Learning, Boston, Massachusetts, USA.

Hwang, J.H., Yang, C.W., Juang, D.S., 2004, A Practical Reliability-Based Method for Assessing Soil Liquefaction Potential, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.24, No.9-10, 761-770.

Idriss, I.M., dan Boulanger, R.W., 2008, *Soil Liquefaction During Earthquakes*, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), USA.

JRA (Japan Rail Association), 1996, *Design Code and Explanation for Roadway Bridges-Seismic Resistance Design 1995 revision*, Japan Rail Association.

Juang, C.H., Fang, S.Y., dan Li, D.L., 2008, Reliability Analysis of Liquefaction Potential of Soils Using Standard Penetration Test, dalam Phoon, K.K, Editor, in *Reliability-Based Design in Geotechnical Engineering*, CRC Press, USA.

Lai, Y.S., Chang, J.W., dan Lin, S.P., 2006, Logistic Regression Model for Evaluating Soil Liquefaction Probability Using CPT Data., *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Div, ASCE*, Vol.132, No.6, 694-704.

Mase, L.Z., dan Sari, A.N., 2015, A Preliminary Evaluation of Liquefaction Potential of Sandy Soil in Lempuing Sub-District (A Coastal Area in Bengkulu City), *Inersia*, Vol.7, No.2, 21-25.

Mase, L.Z., dan Somantri, A.K., 2016, Analisis Potensi Likuifaksi di Kelurahan Lempuing Kota Bengkulu Menggunakan Percepatan Maksimum Kritis, *Potensi*, Vol.25, No.1, 1-11.

Misliniyati, R., Mawardi, Besperi, Razali, M.R., Mukhtadir, R., 2013, Pemetaan Potensi Likuifaksi Wilayah Pesisir Berdasarkan Data Cone Penetration Test di Kelurahan Lempuing, *Inersia*, Vol.5, No.2, 1-8.

Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., dan Chung, R.M., 1985, Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluation, *Journal of Geotechnical Engineering Div, ASCE*, Vol.111, No.12, 1425-1445.

Sonmez, H., dan Gokceoglu, C., 2005, A Liquefaction Severity Index Suggested for Engineering Practice, *Environmental Geology*, Vol.48, No.1, 81-91.

Tokimatsu, K., dan Yoshimi, Y., 1983, Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT Values and Fines Content, *Soils and Foundations*, Vol.23, No.4, 56-74.

Youd T.L., dan Idriss, I.M, 2001, Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from The 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Div, ASCE*, Vol. 127, No.4, 297-313.

