

ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI TANAH BERDASARKAN DATA STANDART PENETRATION TEST (SPT) STUDI KASUS : DERMAGA BITUNG, SULAWESI UTARA

Kurnia Christy Tijow

Oktovian B. A. Sompie, Jack H. Ticoh

Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Sam Ratulangi Manado

ABSTRAK

Salah satu dampak yang disebabkan oleh gempa bumi adalah fenomena hilangnya kekuatan lapisan tanah akibat getaran yang disebut dengan likuifaksi. Likuifaksi biasanya terjadi pada tanah pasir yang bersifat lepas (*loose*). Analisis ini bertujuan untuk mengetahui potensi terjadinya likuifaksi pada Dermaga Bitung, Sulawesi Utara. Analisis potensi likuifaksi dilakukan dengan menggunakan metode yang diusulkan oleh Seed dan Idriss (1981), yaitu pertama mengumpulkan data pengujian tanah SPT di lokasi tersebut, serta melihat data percepatan gempa di lokasi tersebut. Berdasarkan data tersebut kemudian dihitung nilai *Cyclic Stress Ratio (CSR)* yang merupakan nilai perbandingan antara tegangan geser rata-rata yang diakibatkan oleh gempa dengan tegangan vertikal efektif di setiap lapisan serta nilai *Cyclic Resistance Ratio (CRR)* yaitu besarnya ketahanan tanah terhadap likuifaksi. Dari nilai-nilai tersebut ditarik satu angka keamanan yang menentukan apakah lapisan tanah yang ditinjau itu berpotensi terjadi likuifaksi atau tidak. Berdasarkan analisis perhitungan yang dilakukan melalui dua titik hasil pengujian tanah yaitu titik bor BH-01 dan titik bor BH-02, dapat disimpulkan bahwa kondisi tanah di Dermaga Bitung, Sulawesi Utara tidak memiliki lapisan tanah yang berpotensi terjadi likuifaksi.

Kata kunci : Gempa bumi, Likuifaksi, *Cyclic Stress Ratio*, *Cyclic Resistance Ratio*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Semakin pesatnya pertumbuhan penduduk di Indonesia juga mengakibatkan pesatnya pembangunan suatu struktur untuk menghubungkan transportasi-transportasi baik darat, laut maupun udara. Salah satu pembangunan struktur tersebut adalah dermaga. Pada pembangunan dermaga, tentunya dibutuhkan sebuah struktur yang mampu menahan berat konstruksi itu sendiri serta gaya-gaya dari luar yaitu pondasi. Selain struktur, lapisan pendukung yaitu tanah harus didesain dengan memperhitungkan pengaruh jika terjadi bencana alam. Salah satu bencana alam yang bisa merusak struktur lapisan tanah yaitu gempa bumi.

Gempa bumi dapat mengakibatkan kegagalan struktur dan hilangnya kestabilan tanah. Kerusakan-kerusakan yang timbul akibat gempa bumi dapat dikategorikan menjadi dua bagian pokok, yaitu kerusakan pada bangunan-bangunan di atas tanah dan kerusakan lingkungan fisik pada permukaan dalam tanah itu sendiri. Kerusakan-kerusakan tanah secara fisik tersebut misalnya adalah terjadinya penurunan tanah (*settlement*), salju longsor/tanah longsor

atau problem-problem lain pada keseimbangan lereng (*landslides and slope stability problems*), batu longsor (*rockslides*), batu jatuh (*rockfalls*), dan likuifaksi (*liquefactions*). Dalam hal ini, penulis mengangkat kerusakan fisik akibat gempa bumi yaitu likuifaksi. Kejadian ini biasanya terjadi pada tanah pasir yang jenuh air. Likuifaksi didefinisikan sebagai transformasi material berbutir dari kondisi solid menjadi cair sebagai akibat dari peningkatan tekanan air pori dan berkurangnya tegangan efektif (Marcuson, 1978). Likuifaksi lebih mungkin terjadi pada tanah tersaturasi air yang belum terkonsolidasi dengan porositas yang rendah, seperti lempung pasir atau pasir dan kerikil halus. Selama gempa bumi terjadi, lapisan pasir yang belum terkonsolidasi akan cenderung mengalami penyusutan volume. Pada waktu yang sama terjadi peningkatan tekanan air pada pori-pori batuan dan menyebabkan penurunan pada kekuatan geser batuan tersebut, yaitu pengurangan pada *effective stress*. Likuifaksi mengakibatkan keruntuhan daya dukung, pergerakan tanah lateral, serta beda penurunan pada bangunan.

Menyangkut hal ini, sangat penting bagi kita untuk menganalisis potensi likuifaksi pada tanah yang akan kita dirikan bangunan. Hal ini yang

melatarbelakangi penulis untuk menganalisis potensi likuifaksi pada tanah.

Rumusan Masalah

Karena likuifaksi biasanya terjadi pada tanah pasir yang jenuh air serta dapat mengakibatkan keruntuhan daya dukung, pergerakan tanah lateral serta penurunan, maka sangat perlu dilakukan analisis potensi likuifaksi pada daerah yang telah dibangun dermaga Bitung, Sulawesi Utara untuk mencegah terjadinya kegagalan struktur bangunan, serta kemungkinan kerugian yang besar bagi masyarakat.

Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk dapat menganalisis potensi likuifaksi pada suatu daerah dengan kasus pada dermaga Bitung, diantaranya

1. Mencari parameter-parameter yang mempengaruhi potensi likuifaksi tanah di lokasi penelitian
2. Menganalisis perhitungan *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dengan menggunakan data *Standart Penetration Test* (SPT) serta data gempa yang pernah terjadi
3. Menghitung faktor keamanan akibat peristiwa likuifaksi pada tanah yang ditinjau berdasarkan data *Standart Penetration Test* (SPT)

Batasan Masalah

Batasan-batasan penelitian yaitu :

1. Analisa potensi likuifaksi menggunakan metode yang diusulkan Seed and Idriss (1982)
2. Data penyelidikan tanah yang digunakan untuk menganalisis potensi likuifaksi adalah data *Standart Penetration Test* (SPT)
3. Variasi yang dibuat dalam analisis hanya pada variasi MAT dari 5 m, 3,5 m, 1,5 m dan 0,5 m serta variasi nilai Magnitude Gempa (M_w) mulai 5,5 SR, 6,0 SR, 6,5 SR, 7,0 SR, 7,5 SR, 8,0 SR, 8,5 SR, 9,0 SR, dan 9,5 SR

Manfaat Penulisan

1. Dapat dijadikan bahan pertimbangan dalam kegiatan perencanaan bangunan sipil dikemudian hari
2. Sebagai referensi dalam perencanaan pondasi khususnya untuk pembangunan dermaga dengan memperhitungkan potensi likuifaksi pada tanah yang ditinjau dengan menggunakan data *Standart Penetration Test* (SPT)

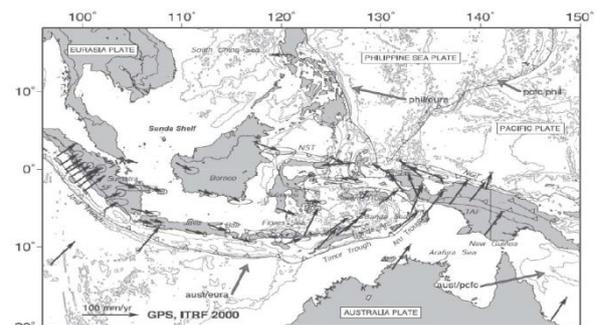
3. Dapat berguna sebagai sumber pengetahuan bagi masyarakat umum mengenai bahaya likuifaksi.

LANDASAN TEORI

Gempa Bumi

Gempa bumi adalah getaran yang terjadi di permukaan bumi akibat pelepasan energi dari dalam secara tiba-tiba yang menciptakan gelombang seismik. Sulawesi Utara merupakan salah Satu

daerah rawan bencana gempa bumi dan tsunami di Indonesia. Dari beberapa pemantauan yang dilakukan oleh para ahli, terdapat beberapa kasus likuifaksi yang terjadi di beberapa daerah di Sulawesi Utara. Untuk itu sangat penting untuk menganalisis potensi likuifaksi di daerah proyek dermaga Bitung agar aman terhadap bahaya likuifaksi apabila terjadi gempa besar.



Gambar 1. Peta Tektonik Kepulauan Indonesia dan sekitarnya (Back., 2003)

Percepatan Gempa (a_{max})

Percepatan Gempa di Batuan Dasar

Percepatan gempa di batuan dasar dapat dihitung dengan mempergunakan fungsi atenuase. Fungsi atenuase adalah suatu fungsi yang menggambarkan korelasi antara intensitas gerakan tanah setempat (a), Magnitude Gempa (M_w) serta jarak dari suatu titik dalam daerah sumber gempa (r).

Rumus fungsi atenuase Joyner & Boore adalah

$$a = 1.0^{[0,71+0,23(M_w-6)-\log(r)-0,0027r]} \quad (1)$$

Percepatan Gempa di Permukaan Tanah

Perubahan percepatan gempa di batuan dasar akan berpengaruh langsung pada percepatan gempa di permukaan tanah. Untuk daerah penelitian Bitung, Sulawesi Utara termasuk dalam Wilayah Gempa 5 dengan nilai percepatan

puncak di batuan dasar sebesar 0,25g (Sumber : SNI 03-1726-2002 “Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Bangunan Gedung”)

Tanah

Jenis tanah ditetapkan sebagai tanah keras, tanah sedang dan tanah lunak dengan tebal maksimum 30 m ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Jenis-Jenis Tanah

Jenis Tanah	Kecepatan rambat gelombang geser rata-rata \bar{V}_s (m/det)	Nilai hasil Test Penetrasi Standar rata-rata \bar{N}	Kuat geser nirair rata-rata \bar{S}_u (kPa)
Tanah Keras	$\bar{V}_s \geq 350$	$\bar{N} \geq 50$	$\bar{S}_u \geq 100$
Tanah Sedang	$175 \leq \bar{V}_s < 350$	$15 \leq \bar{N} < 50$	$50 \leq \bar{S}_u < 100$
Tanah Lunak	$\bar{V}_s < 175$	$\bar{N} < 15$	$\bar{S}_u < 50$
	Atau setiap profil dengan tanah lunak yang tebal total lebih dari 3 m dengan $PI > 20$, $w_n \geq 40\%$ dan $S_u < 25$ kPa		
Tanah Khusus	Diperlukan evaluasi khusus di setiap lokasi		

(Sumber: SNI 03-1726)

Likuifaksi

Likuifaksi adalah proses berkurangnya kekuatan geser tanah akibat beban seismik ketika terjadi gempa bumi. Menurut Towhata (2008) likuifaksi terjadi pada tanah yang berpasir lepas (tidak padat) dan jenuh air. Kondisi ini dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\sigma' = \sigma - u \tag{2}$$

dimana,

σ' = tegangan efektif,

σ = tegangan total (berat permukaan tanah)

u = tekanan air pori

Seed et al (1975) menyatakan bahwa likuifaksi adalah proses perubahan kondisi tanah pasir yang jenuh air menjadi cair akibat meningkatnya tekanan air pori yang harganya menjadi sama dengan tekanan total oleh sebab terjadinya beban dinamik, sehingga tegangan efektif tanah menjadi nol.

Menurut Wang dan Law (1994) faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya likuifaksi dapat dikelompokkan menjadi dua bagian pokok yaitu gaya gempa (intensitas dan arah getaran) serta kondisi tanah dan lingkungan (properti tanah, kondisi topografi, muka air tanah, dsb).

Parameter-Parameter Yang Mempengaruhi Potensi Likuifaksi Pada Tanah

Tegangan Vertikal Total (σ_v)

Tegangan vertikal total dapat dihitung dengan rumus :

$$\sigma_v = \Sigma (\gamma \cdot H) \tag{3}$$

dimana :

σ_v = Tegangan Vertikal Total (kN/m²)

γ = Berat isi lapisan tanah (kN/m³)

H = Tebal lapisan tanah (m)

Tegangan Vertikal Efektif (σ'_v)

Tegangan vertikal efektif dapat dihitung dengan rumus :

$$\sigma'_v = \sigma_v - \mu \tag{4}$$

dimana :

σ'_v = Tegangan Vertikal Efektif (kN/m²)

σ_v = Tegangan Vertikal Total (kN/m²)

μ = Tegangan air pori (kN/m²) = $\gamma_w \cdot H$

γ_w = Berat isi air (kN/m³)

H = Tebal lapisan (m)

Korelasi Nilai SPT (Standart Penetration Test)

Berdasarkan nilai SPT, bahaya potensi likuifaksi dapat dituliskan sebagai berikut :

N SPT = 0–20 (Potensi likuifaksi besar)

N SPT = 20–30 (Potensi likuifaksi sedang)

N SPT > 30 (Potensi likuifaksi tidak berarti)

Faktor Reduksi (r_d)

Faktor reduksi merupakan nilai yang dapat mempengaruhi tegangan di dalam tanah. Semakin jauh kedalaman tanah maka faktor reduksi akan semakin kecil.

Berikut adalah rumus r_d yang diusulkan oleh T. F. Blake (1996) dalam Youd and Idriss (2001), yaitu :

$$r_d = \frac{(1.000 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5})}{(1.000 - 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.001210z^2)} \tag{5}$$

Dimana z adalah kedalaman lapisan tanah yang ditinjau.

Metode-Metode Untuk Mengevaluasi Potensi Likuifaksi

Pada dasarnya, analisis potensi likuifaksi adalah mencari 2 parameter utama, yaitu : *Cyclic Stress Ratio* (CSR) yang merupakan tegangan siklik yang terjadi akibat gempa dibagi dengan tegangan efektif dan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) yang merupakan ketahanan tanah untuk menahan likuifaksi.

Cyclic Stress Ratio (CSR)

Cyclic Stress Ratio adalah tegangan siklik yang terjadi akibat gempa dibagi dengan tegangan efektif. Seed dan Idriss (1971) memformulasikan persamaan untuk rasio tegangan siklik (CSR), yaitu :

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) r_d \quad (6)$$

Dimana :

- a_{max} = percepatan horizontal maksimum tanah
- g = percepatan gravitasi
- σ_{vo} = tegangan vertikal overburden total
- σ'_{vo} = tegangan vertikal overburden efektif

Menurut metode yang disarankan oleh Seed dan Idriss, tegangan geser yang menyebabkan likuifaksi dapat dihitung dari tegangan geser siklik τ_{av} yang dihasilkan pada setiap titik pada lapisan tanah, dan dinyatakan dengan rumus :

$$\tau_{av} = 0.65 \cdot \gamma \cdot z \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot r_d \quad (7)$$

dimana:

- γ = berat satuan total
- z = kedalaman
- g = percepatan gravitasi
- a_{max} = percepatan horizontal maksimum tanah
- r_d = faktor reduksi kedalaman

Faktor 0.65 adalah asumsi bahwa tegangan geser seragam ekivalen adalah 65% dari tegangan geser maksimum absolut yang dihasilkan oleh gempa.

Cyclic Resistance Ratio (CRR)

Nilai *Cyclic Resistance Ratio* dapat diperoleh melalui pengujian lapangan seperti *Standart Penetration Test (SPT)*.

Standart Penetration Test (SPT)

Metode evaluasi *Cyclic Resistance Ratio (CRR)* dengan kriteria untuk evaluasi tahanan likuifaksi berdasarkan nilai SPT yang telah digunakan selama bertahun-tahun. Dasar dari analisis potensi likuifaksi adalah pasir bersih (*clean sands*), dimana kandungan butiran halusnya kurang dari 5%.

Universitas di Texas, A. F. Rauch (1998) memperkirakan plot kurva *clean-sands* dengan persamaan sebagai berikut :

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{(34 - (N_1)_{60cs})} + \frac{(N_1)_{60cs}}{135} + \frac{50}{[10 \cdot (N_1)_{60cs} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (8)$$

Karakteristik lain dari tanah seperti plastisitas tanah, dapat mempengaruhi ketahanan likuifaksi, namun koreksi untuk faktor-faktor ini belum dikembangkan. Persamaan berikut ini dikembangkan oleh I. M. Idriss dengan bantuan R. B. Seed untuk faktor koreksi $(N_1)_{60cs}$:

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (9)$$

nilai-nilai α dan β dipengaruhi oleh persentase *finer content FC*,

$$\alpha = 0, \quad \beta = 1, \quad FC \leq 5\%$$

$$\alpha = \exp[1,76 - (190/FC^2)] \quad 5\% < FC < 35 \quad (13)$$

$$\beta = [0, 99 - (FC^{1.5}/1000)] \quad 5\% < FC < 35\% \quad (14)$$

$$\alpha = 5,0 \quad \beta = 1,2 \quad FC \geq 35\%$$

Youd dan Idriss (2001) dan Cetin dll. (2004) memberikan koreksi untuk mendapatkan nilai $(N_1)_{60}$, yaitu :

$$(N_1)_{60} = N_M C_N C_E C_B C_R C_S \quad (10)$$

N_M = N-SPT yang diperoleh dari tes lapangan

C_N = Faktor koreksi untuk normalisasi *effective overburden pressure* σ'_{vo}

C_E = Koreksi untuk *efficiency energy*

C_B = Koreksi untuk diameter *borehole*

C_R = Faktor koreksi dari panjang tali (*rod length*)

C_S = Koreksi untuk sampel d atau tidaknya (*linier*)

Magnitude Scaling Factors (MSF)

Gempa dengan $M = 7,5$ dinyatakan sebagai gempa referensi Youd dan Idriss, 2001; Olson dkk, 2005) sehingga perlu dilakukan koreksi untuk gempa dengan besaran magnitude yang lebih kecil atau lebih besar dari 7.5.

Berdasarkan hasil re-evaluasi oleh Seed dan Idriss, mereka mendapatkan nilai MSF untuk magnitude lebih kecil dari 7,5 dan magnitude lebih besar dari 7,5 yaitu sebagai berikut :

$$M_w < 7,5 \quad MSF = 10^{2,24} / M_w^{2,56} \quad (11a)$$

$$M_w > 7,5 \quad MSF = \left(\frac{M_w}{7,5} \right)^{-2,56} \quad (11b)$$

Nilai magnitude gempa yang akan diambil adalah dari 5,5 sampai 9,5. Magnitude gempa dibawah 5,5 biasanya tidak ada potensi mengalami likuifaksi. Sedangkan magnitude gempa diatas 9,5 adalah magnitude gempa yang jarang sekali terjadi di Indonesia, khususnya di Sulawesi Utara dan tidak pernah terjadi di daerah sekitar penelitian yaitu daerah Bitung.

Untuk menghitung CRR dengan besar magnitude jggempa selain 7,5, diperlukan faktor koreksi yang disebut *Magnitude Scale Factor (MSF)*. Seed (1983) memberikan persamaan, yaitu :

$$CRR_{MW} = CRR_{7.5} * MSF * K\sigma * K\alpha \quad (12)$$

Untuk nilai variabel $K\sigma$ & $K\alpha$ dalam perhitungan biasanya hanya dalam kasus khusus sehingga dalam kasus ini, $K\sigma$ & $K\alpha$ bernilai 1.

Faktor Keamanan (FS)

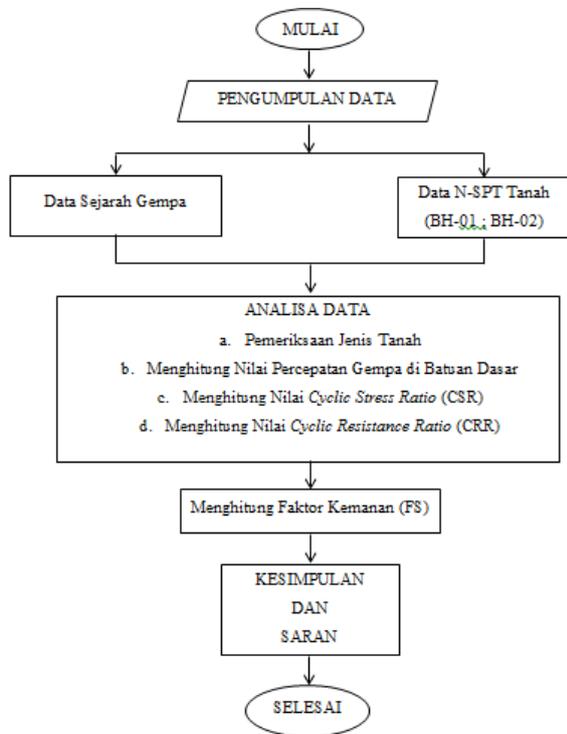
Faktor keamanan merupakan perbandingan dari nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dan *Cyclic Resistance Ration* (CRR) seperti ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (13)$$

METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan penulis dalam pembuatan penelitian ini adalah berdasarkan data tes lapangan, yaitu *Standard Penteration Test* (SPT) dengan studi kasus pada dermaga Bitung, Sulawesi Utara.

Diagram Alir Penelitian



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

PEMBAHASAN

Data tanah di lokasi yang ada adalah data dari pengujian *Standard Penetration Test* (SPT), maka yang dilihat adalah nilai standart penetrasi rata-rata (\bar{N}). Berikut ini adalah tabel pemeriksaan tanah yang ada di titik bor lokasi penelitian.

Tabel 2. Pemeriksaan Jenis Tanah di Titik BH-01 dan BH-02

SOIL PROFIL	SOIL DESCRIPTION	KEDALAMAN (m)	N-SPT		JENIS TANAH
			BH-01	BH-02	
	Lanas sedikit berpasir lepas, warna cokelat	2.00	5	2	$\bar{N} = 30$ Tanah Sedang
		4.00	12	7	
	Lanas berpasir agak lepas, warna cokelat agak kehitaman	6.00	15	12	
		8.00	19	13	
	Lanas berpasir agak padat, warna cokelat kehitaman	10.00	24	22	
		12.00	24	28	
		14.00	25	30	
		16.00	28	33	
	Lanas berpasir sedikit berlempung agak padat, warna cokelat tua kehitaman	18.00	32	39	
		20.00	35	42	
		22.00	41	36	
	Lanas berpasir agak padat, warna cokelat kehitaman	24.00	45	41	
		26.00	37	42	
		28.00	46	44	
		30.00	49	46	

Dari hasil yang ditunjukkan dalam dalam tabel, menunjukkan bahwa nilai standart penetrasi rata-rata berada di $15 \leq \bar{N} < 50$ dan sesuai dengan tabel 2. menandakan bahwa jenis tanah di lokasi yang ditinjau memiliki jenis tanah sedang.

Menghitung nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) yang disebabkan oleh gempa bumi.

Nilai CSR dihitung dengan melihat seberapa besar nilai percepatan gempa yang terjadi.

Tabel 3. Daftar Kejadian Gempa yang pernah terjadi di Bitung, Sulawesi Utara 10 tahun terakhir & Perhitungan nilai percepatan gempa di permukaan tanah

Date	Time	Depth (m)	Mag (M _w)	r ₀	r	R	a _{max}
12/16/2008	6:02:10	207	5.7	15.76	17.67421	207.59908	0.22179
12/12/2008	7:14:42	10	6	58.23	58.77698	59.08242	0.06055
12/11/2008	21:40:54	133	6	100.85	101.16681	166.91232	0.02703
9/8/2009	18:51:28	54	5.8	101.29	101.60543	114.78530	0.02414
8/29/2009	15:40:20	33	5.5	20.39	21.90324	38.79113	0.15680
6/16/2009	7:05:57	131	6	67.52	67.99228	147.37690	0.04943
1/9/2009	11:30:43	10	5.6	15.64	17.56729	18.56366	0.21177
5/16/2010	0:33:09	127	5.7	97.03	97.35924	159.82434	0.02453
5/8/2010	5:39:28	10	5.8	16.72	18.53533	19.48226	0.22180
12/19/2011	1:23:25	10	5.6	12.9	15.17926	16.32207	0.24875
12/13/2011	7:52:13	161	6.2	96.95	97.27951	187.93696	0.03201
12/2/2011	5:19:28	82	5	100.12	100.43911	129.41412	0.01610
12/1/2011	22:53:38	11	5.6	79.68	80.08060	80.43570	0.03150
11/15/2011	10:43:51	258	5.6	80.26	80.65772	270.19561	0.03116
5/6/2011	6:46:27	91	5.6	92.69	93.03460	129.89394	0.02501
4/24/2011	23:07:54	12	5.9	96.45	96.78121	97.19363	0.02754
12/17/2012	9:16:33	45	6.1	95.32	95.65512	105.40827	0.03119
11/6/2012	1:36:25	51	5.7	101.79	102.10389	113.85168	0.02271
8/18/2012	41:53.6	10	6.2	98.71	99.03365	99.21524	0.03110
4/16/2012	17:51.9	22	5.8	97.98	98.30605	100.41952	0.02547
10/12/2013	30:09.2	85	5.8	87.23	87.59608	121.79521	0.03055
4/30/2013	33:07.4	54	5.6	49.07	49.71785	72.96482	0.06127
12/3/2014	27:05.9	17	5.6	42.64	43.38398	45.90392	0.07304
6/21/2014	51:51.6	102	5.5	31.72	32.71328	106.81834	0.09816
2/18/2014	34:12.3	31	5.5	26.62	27.79612	40.86104	0.11911
3/28/2015	28:52.2	111	6	21.84	23.25910	113.12818	0.19081
3/15/2015	17:17.5	30	6	79.8	80.20000	85.25280	0.03884
12/6/2017	06:58.4	41	5.5	97.11	97.43897	105.41040	0.02204
7/15/2017	12:21.3	119	6	100.86	101.17677	155.99275	0.02702
5/24/2017	10:15.5	12	5.6	94.8	95.13695	95.55648	0.02414
3/31/2017	21:00.1	98	5.5	89.16	89.51819	132.48964	0.02520

dimana :

a_{max} = Nilai percepatan gempa dihitung dengan rumus fungsi atenuase

Depth (h) = Kedalaman fokus gempa

Mag (M_w) = Magnitude gempa

r_o = Jarak lokasi dengan episenter

$r = \sqrt{r_o^2 + 8^2}$

R = Jarak Hipocenter $\sqrt{r^2 + h^2}$ (Km)

Nilai percepatan gempa yang didapat untuk daerah penelitian yang sudah dihitung menggunakan rumus fungsi atenuase didapat harga percepatan gempa di permukaan tanah sebesar 0,24875g dan dibulatkan menjadi 0,25g.

Korelasi nilai N-SPT dengan Parameter Tanah

Tabel 4. Korelasi antara nilai N-SPT dengan nilai parameter tanah γ_d & γ_{sat}

DEPTH (m)	N-SPT	KOREKSI N-SPT				N_{60}	γ_{sat}	γ_w	γ_d
		E_H	C_B	C_s	C_r		kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³
2.00	5	0.60	1.00	1.00	0.85	4.25	17.41	16.43	0.99
4.00	12	0.60	1.00	1.00	0.85	10.20	18.30	17.02	1.28
6.00	15	0.60	1.00	1.00	0.85	12.75	18.68	17.28	1.41
8.00	19	0.60	1.00	1.00	0.85	16.15	19.19	17.62	1.57
10.00	24	0.60	1.00	1.00	0.85	20.40	19.82	18.04	1.78
12.00	24	0.60	1.00	1.00	0.85	20.40	19.82	18.04	1.78
14.00	25	0.60	1.00	1.00	0.85	21.25	19.95	18.13	1.82
16.00	28	0.60	1.00	1.00	0.85	23.80	20.33	18.38	1.95
18.00	32	0.60	1.00	1.00	0.85	27.20	20.83	18.72	2.11
20.00	35	0.60	1.00	1.00	0.85	29.75	21.21	18.98	2.24
22.00	41	0.60	1.00	1.00	0.85	34.85	21.97	19.49	2.49
24.00	45	0.60	1.00	1.00	0.85	38.25	22.48	19.83	2.65
26.00	37	0.60	1.00	1.00	0.85	31.45	21.47	19.15	2.32
28.00	46	0.60	1.00	1.00	0.85	39.10	22.61	19.91	2.70
30.00	49	0.60	1.00	1.00	0.85	41.65	22.99	20.17	2.82

Perhitungan Nilai Tegangan Total dan Tegangan Efektif Tanah

Tabel 5. Perhitungan Nilai Tegangan Total dan Tegangan Efektif Tanah Titik BH-01, MAT 5,0 m

KEDALAMAN (m)	γ_d (kN/m ³)	Teg. Total (σ) (kN/m ²)	u (kN/m ²)	Teg. Efektif (σ') (kN/m ²)
2.00	7.60	38.02	-29.43	67.45
4.00	8.49	42.45	-9.81	52.26
6.00	8.87	63.03	9.81	53.22
8.00	9.38	104.45	29.43	75.02
10.00	10.01	149.15	49.05	100.10
12.00	10.01	188.79	68.67	120.12
14.00	10.14	230.21	88.29	141.92
16.00	10.52	276.18	107.91	168.27
18.00	11.02	325.95	127.53	198.42
20.00	11.40	375.22	147.15	228.07
22.00	12.16	434.36	166.77	267.59
24.00	12.67	490.46	186.39	304.07
26.00	11.66	509.08	206.01	303.07
28.00	12.80	583.93	225.63	358.30
30.00	13.18	640.54	245.25	395.29

Metode Evaluasi Potensi Likuifaksi Menghitung Nilai Cyclic Stress Ratio (CSR)

Tabel 6. Perhitungan Nilai Tegangan Total dan Tegangan Efektif Tanah

KEDALAMAN (m)	σ/σ'	A_{max}	g (m/s ²)	rd	CSR
2.00	0.56	0.25	9.81	0.9870	0.0092
4.00	0.81	0.25	9.81	0.9735	0.0131
6.00	1.18	0.25	9.81	0.9596	0.0188
8.00	1.39	0.25	9.81	0.9404	0.0217
10.00	1.49	0.25	9.81	0.9096	0.0224
12.00	1.57	0.25	9.81	0.8625	0.0225
14.00	1.62	0.25	9.81	0.8009	0.0215
16.00	1.64	0.25	9.81	0.7343	0.0200
18.00	1.64	0.25	9.81	0.6732	0.0183
20.00	1.65	0.25	9.81	0.6234	0.0170
22.00	1.62	0.25	9.81	0.5854	0.0157
24.00	1.61	0.25	9.81	0.5568	0.0149
26.00	1.68	0.25	9.81	0.5350	0.0149
28.00	1.63	0.25	9.81	0.5180	0.0140
30.00	1.62	0.25	9.81	0.5042	0.0135

Menghitung Nilai Cyclic Resistance Ratio (CRR)

CRR dengan Koreksi Clean Sands

Tabel 7. Perhitungan Nilai CRR_{7.5} pada Titik BH-01 dengan koreksi Fines Content 5%

KEDALAMAN (m)	(N_1) ₆₀	FC	α	β	(N_1) _{60CS}	CRR _{7.5}
2.00	4.3702	5	0	1	4.3702	0.0675
4.00	11.4257	5	0	1	11.4257	0.1259
6.00	14.2019	5	0	1	14.2019	0.1521
8.00	15.9546	5	0	1	15.9546	0.1698
10.00	17.8317	5	0	1	17.8317	0.1899
12.00	16.3305	5	0	1	16.3305	0.1737
14.00	15.5828	5	0	1	15.5828	0.1660
16.00	15.8443	5	0	1	15.8443	0.1687
18.00	16.3806	5	0	1	16.3806	0.1742
20.00	16.3800	5	0	1	16.3800	0.1742
22.00	17.2196	5	0	1	17.2196	0.1832
24.00	17.2647	5	0	1	17.2647	0.1837
26.00	14.2292	5	0	1	14.2292	0.1524
28.00	15.6378	5	0	1	15.6378	0.1665
30.00	15.4564	5	0	1	15.4564	0.1647

CRR dengan Faktor Koreksi Magnitude Scaling Factor (MSF)

Tabel 8. Hasil Perhitungan Nilai MSF dengan magnitude gempa 5,5 SR, 6,0 SR, 6,5 SR 7,0 SR, 7,5 SR, 8,0 SR, 8,5 SR, 9,0 SR, 9,5 SR

DEPTH (m)	MSF									
	5,5 SR	6,0 SR	6,5 SR	7,0 SR	7,5 SR	8,0 SR	8,5 SR	9,0 SR	9,5 SR	
2.00	2.2122	1.7705	1.4424	1.1932	1.0000	0.8477	0.7258	0.6270	0.5460	
4.00	2.2122	1.7705	1.4424	1.1932	1.0000	0.8477	0.7258	0.6270	0.5460	
6.00	2.2122	1.7705	1.4424	1.1932	1.0000	0.8477	0.7258	0.6270	0.5460	
8.00	2.2122	1.7705	1.4424	1.1932	1.0000	0.8477	0.7258	0.6270	0.5460	
10.00	2.2122	1.7705	1.4424	1.1932	1.0000	0.8477	0.7258	0.6270	0.5460	
12.00	2.2122	1.7705	1.4424	1.1932	1.0000	0.8477	0.7258	0.6270	0.5460	
14.00	2.2122	1.7705	1.4424	1.1932	1.0000	0.8477	0.7258	0.6270	0.5460	
16.00	2.2122	1.7705	1.4424	1.1932	1.0000	0.8477	0.7258	0.6270	0.5460	
18.00	2.2122	1.7705	1.4424	1.1932	1.0000	0.8477	0.7258	0.6270	0.5460	
20.00	2.2122	1.7705	1.4424	1.1932	1.0000	0.8477	0.7258	0.6270	0.5460	
22.00	2.2122	1.7705	1.4424	1.1932	1.0000	0.8477	0.7258	0.6270	0.5460	
24.00	2.2122	1.7705	1.4424	1.1932	1.0000	0.8477	0.7258	0.6270	0.5460	
26.00	2.2122	1.7705	1.4424	1.1932	1.0000	0.8477	0.7258	0.6270	0.5460	
28.00	2.2122	1.7705	1.4424	1.1932	1.0000	0.8477	0.7258	0.6270	0.5460	
30.00	2.2122	1.7705	1.4424	1.1932	1.0000	0.8477	0.7258	0.6270	0.5460	

Dari hasil perhitungan yang ditunjukkan dalam tabel diatas, bisa dilihat untuk setiap lapisan tanah dengan variasi magnitudo gempa, bisa dilihat bahwa semakin nilai MSF akan semakin kecil seiring dengan bertambahnya besaran skala magnitudo gempa yang terjadi.

Setelah didapat nilai MSF untuk masing-masing magnitudo gempa, maka dicari nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dengan faktor koreksi MSF dengan mengikuti persamaan (20). Tabel 9. menunjukkan hasil perhitungan CRR_{Mw} dengan besaran MSF yang sudah ada.

Tabel 9. Hasil Perhitungan Nilai CRR_{Mw} dengan magnitudo gempa 5,5 SR, 6,0 SR, 6,5 SR 7,0 SR, 7,5 SR, 8,0 SR, 8,5 SR, 9,0 SR, 9,5 SR

DEPTH (m)	CRR_{Mw}									
	5,5 SR	6,0 SR	6,5 SR	7,0 SR	7,5 SR	8,0 SR	8,5 SR	9,0 SR	9,5 SR	9,5 SR
2.00	0.1493	0.1195	0.0973	0.0805	0.0675	0.0572	0.1493	1.0000	0.0368	
4.00	0.2785	0.2229	0.1816	0.1502	0.1259	0.1067	0.2785	1.0000	0.0687	
6.00	0.3366	0.2694	0.2195	0.1815	0.1521	0.1290	0.3366	1.0000	0.0831	
8.00	0.3756	0.3006	0.2449	0.2026	0.1698	0.1439	0.3756	1.0000	0.0927	
10.00	0.4202	0.3363	0.2740	0.2266	0.1899	0.1610	0.4202	1.0000	0.1037	
12.00	0.3843	0.3076	0.2506	0.2073	0.1737	0.1473	0.3843	1.0000	0.0948	
14.00	0.3672	0.2938	0.2394	0.1980	0.1660	0.1407	0.3672	1.0000	0.0906	
16.00	0.3731	0.2986	0.2433	0.2012	0.1687	0.1430	0.3731	1.0000	0.0921	
18.00	0.3855	0.3085	0.2513	0.2079	0.1742	0.1477	0.3855	1.0000	0.0951	
20.00	0.3854	0.3085	0.2513	0.2079	0.1742	0.1477	0.3854	1.0000	0.0951	
22.00	0.4053	0.3244	0.2643	0.2186	0.1832	0.1553	0.4053	1.0000	0.1000	
24.00	0.4064	0.3252	0.2650	0.2192	0.1837	0.1557	0.4064	1.0000	0.1003	
26.00	0.3372	0.2698	0.2198	0.1818	0.1524	0.1292	0.3372	1.0000	0.0832	
28.00	0.3684	0.2948	0.2402	0.1987	0.1665	0.1412	0.3684	1.0000	0.0909	
30.00	0.3643	0.2916	0.2375	0.1965	0.1647	0.1396	0.3643	1.0000	0.0899	

Hasil analisis perhitungan faktor keamanan yang ditunjukkan dalam tabel 4.9 yaitu hasil analisis pada titik bor BH-01 dengan MAT 5 m dan dintinjau dengan skala magnitudo M_w 8,0 SR.

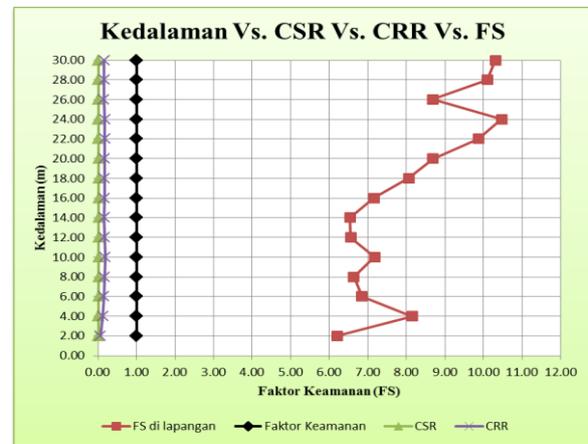
Tabel 10. Hasil Perhitungan Angka Faktor Keamanan untuk Titik Bor BH-01 dengan MAT 5 m dan Skala Magnitudo Gempa 8,0 SR

KEDALAMAN (m)	CSR	CRR_{Mw}	FS
2.00	0.0092	0.0572	6.2067
4.00	0.0131	0.1067	8.1479
6.00	0.0188	0.1290	6.8508
8.00	0.0217	0.1439	6.6364
10.00	0.0224	0.1610	7.1723
12.00	0.0225	0.1473	6.5584
14.00	0.0215	0.1407	6.5374
16.00	0.0200	0.1430	7.1615
18.00	0.0183	0.1477	8.0630
20.00	0.0170	0.1477	8.6932
22.00	0.0157	0.1553	9.8670
24.00	0.0149	0.1557	10.4675
26.00	0.0149	0.1292	8.6783
28.00	0.0140	0.1412	10.0947
30.00	0.0135	0.1396	10.3152

Dari hasil perhitungan yang didapat, mengartikan bahwa lapisan tanah di lokasi penelitian, yang diwakili oleh titik bor BH-01 dengan variasi MAT 5 m dan besaran magnitudo gempa 8,0 SR memiliki angka keamanan lebih dari 1 yang mengartikan lokasi tersebut tidak memiliki potensi untuk terjadi likuifaksi jika terjadi gempa dengan skala 8,0 SR dan jika muka air tanah berada pada kedalaman 5 m.

Hasil Pengolahan Data Analisis Potensi Likuifaksi di Titik BH-01

Grafik Kedalaman Vs. CSR Vs. CRR Vs. FS Hubungan-hubungan Kedalaman Vs. CSR Vs. CRR Vs. FS , diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Hubungan antara Kedalaman Vs. CSR Vs. CRR Vs. FS

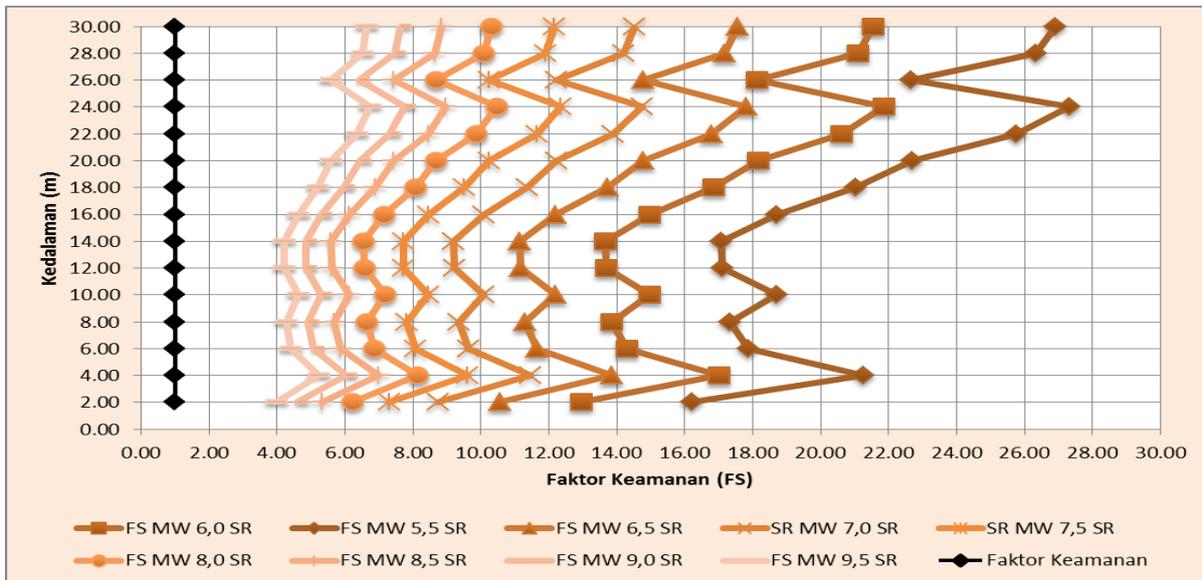
Variasi Nilai Muka Air Tanah (MAT) dan Nilai Magnitudo Gempa (M_w)

Hubungan antara nilai muka air tanah dan nilai magnitudo gempa sebagai berikut:

- Semakin kecil nilai muka air tanah (MAT) maka nilai faktor keamanan akan semakin kecil.
- Semakin besar nilai magnitudo gempa (M_w), nilai faktor keamanan akan semakin kecil.
- Faktor keamanan yang didapat dari setiap variasi menunjukkan semuanya tidak ada yang berpotensi terjadi likuifaksi.
- Tanah pada lokasi pengujian umumnya didominasi oleh jenis lanau berpasir.
- Analisis data dilakukan dengan dua metode yaitu *Cyclic Stress Ratio* dan *Cyclic Resistance Ratio* dimana hasilnya adalah nilai CSR harganya lebih kecil dibandingkan dengan harga CRR

Tabel 11. Variasi Nilai Faktor Keamanan (FS) Hasil Analisis Potensi Likuifaksi di Titik BH-01 dengan MAT 5 m dengan Variasi Magnitude Gempa 5,5 SR – 9,5 SR

SOIL PROFIL	SOIL DESCRIPTION	KEDALAMAN (m)	FAKTOR KEAMANAN								
			Mw 5,5 SR	Mw 6,0 SR	Mw 6,5 SR	Mw 7,0 SR	Mw 7,5 SR	Mw 8,0 SR	Mw 8,5 SR	Mw 9,0 SR	Mw 9,5 SR
	Lanau sedikit berpasir lepas, warna cokelat	2.00	16.1973	12.9630	10.5612	8.7362	7.3218	6.2067	5.3145	4.5910	3.9976
		4.00	21.2631	17.0172	13.8643	11.4685	9.6117	8.1479	6.9766	6.0269	5.2479
	Lanau berpasir agak lepas, warna cokelat agak kehitaman	6.00	17.8782	14.3082	11.6572	9.6428	8.0816	6.8508	5.8660	5.0675	4.4125
		8.00	17.3188	13.8605	11.2924	9.3410	7.8287	6.6364	5.6824	4.9089	4.2744
	Lanau berpasir agak padat, warna cokelat kehitaman	10.00	18.7171	14.9796	12.2042	10.0952	8.4608	7.1723	6.1412	5.3052	4.6195
		12.00	17.1151	13.6975	11.1596	9.2312	7.7366	6.5584	5.6156	4.8512	4.2241
		14.00	17.0602	13.6535	11.1238	9.2016	7.7118	6.5374	5.5976	4.8356	4.2106
		16.00	18.6890	14.9571	12.1859	10.0801	8.4481	7.1615	6.1320	5.2973	4.6126
	Lanau berpasir sedikit berlempung agak padat, warna cokelat tua kehitaman	18.00	21.0415	16.8399	13.7198	11.3489	9.5115	8.0630	6.9039	5.9641	5.1932
		20.00	22.6861	18.1561	14.7921	12.2360	10.2549	8.6932	7.4435	6.4303	5.5991
		22.00	25.7494	20.6077	16.7895	13.8882	11.6396	9.8670	8.4486	7.2985	6.3551
		24.00	27.3166	21.8619	17.8113	14.7334	12.3480	10.4675	8.9628	7.7427	6.7419
	Lanau berpasir agak padat, warna cokelat kehitaman	26.00	22.6472	18.1249	14.7668	12.2150	10.2373	8.6783	7.4307	6.4192	5.5895
		28.00	26.3437	21.0833	17.1770	14.2087	11.9083	10.0947	8.6436	7.4670	6.5018
		30.00	26.9191	21.5438	17.5522	14.5191	12.1684	10.3152	8.8324	7.6301	6.6438



Gambar 4. Hubungan Faktor Keamanan (FS) Hasil Analisis Potensi Likuifaksi di Titik BH-01 dengan MAT 5m dengan Variasi Magnitude Gempa 5,5 SR – 9,5 SR

- Harga CSR untuk Titik Bor BH-01 untuk masing-masing magnitude gempa nilainya sama dengan harga CSR untuk titik bor BH-02
- Harga CRR untuk Titik Bor BH-01 untuk masing-masing magnitude gempa nilainya lebih besar dibandingkan dengan harga CRR untuk titik bor BH-02
- Dengan berbedanya harga CRR untuk masing-masing titik bor, maka nilai faktor keamanan juga berbeda untuk setiap titik bor.
- Dari hasil analisis yang dilakukan didapat bahwa semakin dalam suatu kedalaman lapisan tanah, maka nilai faktor keamanan yang didapat juga semakin besar yaitu lebih dari satu.
- Nilai faktor keamanan yang didapat disetiap lapisan tanah untuk titik bor BH-01 dan BH-02 nilainya lebih dari satu dengan arti bahwa dua titik yang diuji ini dua-duanya tidak berpotensi terjadi likuifaksi.
- Semakin besar skala magnitude gempa yang terjadi, maka harga CRR semakin kecil sehingga menyebabkan nilai faktor keamanan semakin besar. Sebaliknya, semakin kecil skala magnitude gempa yang terjadi maka harga CRR akan semakin besar menyebabkan nilai faktor keamanan semakin kecil.

- Nilai muka air tanah sedikit dalam yaitu 5,5 m sangat menentukan nilai faktor keamanan sehingga lapisan tanah di dua titik tersebut tidak berpotensi terjadi likuifaksi. Semakin dangkal nilai muka air tanah, maka semakin kecil juga nilai faktor keamanan yang mengakibatkan suatu tanah berpotensi terjadi likuifaksi.

PENUTUP

Kesimpulan

1. Parameter-parameter tanah yang dianalisis, yaitu pemeriksaan jenis tanah yang ada di lokasi menunjukkan jenis tanah sedng dengan nilai N rata-rata = 30 serta nilai tegangan total dan tegangan efektif untuk masing-masing titik bor BH-01 dan BH-02 nilainya berbeda karena dianalisis berdasarkan data N -SPT masing-masing titik
2. Dengan menggunakan rumus fungsi atenuase yang dikemukakan oleh Joyner dan Boore maka didapat nilai percepatan gempa untuk daerah Bitung, Sulawesi Utara yaitu 0,25g yang mengartikan bahwa lokasi penelitian perlu dilakukan analisis terhadap potensi likuifaksi karena nilai a_{max} melebihi 0,1g. Nilai CSR dan CRR untuk masing-masing

titik bor berbeda tapi keduanya memiliki nilai dibawah angka 1. Untuk masing-masing titik bor nilai CRRnya lebih besar dari nilai CSR.

3. Analisis perhitungan yang didapat untuk setiap titik bor dengan variasi nilai MAT dan nilai magnitude gempa, semuanya menunjukkan harga faktor keamana lebih dari satu yang mengartikan untuk setiap titik bor tidak berpotensi terjadi likuifaksi dengan magnitude gempa yang sudah divariasikan.

Saran

1. Hasil analisis perhitungan yang diperoleh sebaiknya dibandingkan dengan metode perhitungan lainnya, seperti perhiungan dengan menggunakan data laboratorium atau juga data pengujian sondir atau *Cone Penetrometer Test* (CPT)
2. Jumlah titik pengujian sebaiknya banyak untuk menganalisis potensi likuifaksi agar boleh ada data pembanding antara satu titik dengan titik lainnya.
3. Sistem pondasi yang akan digunakan untuk suatu struktur bangunan sipil baik dermaga maupun bangunan sipil lain sebaiknya menggunakan pondasi dalam sehingga boleh mencapai suatu kedalaman yang aman terhadap perilaku likuifaksi.

DAFTAR PUSTAKA

- _____ (2002). *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung*. SNI-1726.
- _____ (2008). *Cara Uji Penetrasi Lapangan dengan SPT*. Jakarta.
- _____ (2010). *Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia*. Bandung.
- Badan Standardisasi Nasional, SNI-03-1726-2002. (2002). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Bangunan Gedung*.
- Lee, C. Y., (2007). *APRN Journal of Engineering and Applied Sciences. Earthquake-Induced Settlements In Saturated Sandy Soils*. Universiti Tenaga Nasional Selangor Malaysia
- Legrans, R. R. (2016). *Studi Potensi Likuifaksi Berdasarkan Uji Penetrasi Standar (SPT) di Pesisir Pantai Belang Minahasa Tenggara*.
- Muntohar, A. S. (2009). *Mikro-Zonasi Potensi Likuifaksi dan Penurunan Tanah Akibat Gempa Bumi*. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

- Sompie, O. B. A., et al., (2017). *Pengaruh Tekanan Air Pori Tanah terhadap Perkuatan Tembok Penahan dan Geotextile*, Jurnal Tekno Vol 15 no. 67
- Sompie, O. B. A., et al., (2011). *Rekayasa Geoteknik dalam Disain DAM Timbunan Tanah*, Jurnal Ilmiah Media Engineering, Vol 1, No. 2.
- T. L. Y., & Christopher, T. G. (1992). *Liquefaction-Induced Ground Surface Disruption*.
- Widodo, P. (2012). *Seismologi Teknik & Rekayasa Kegempaan*. Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia.
- Youd T., & Garris T. (1996, 1998). *Liquefaction-Induced Ground Surface Disruption*. Brigham Young University
- Youd, T., & dkk. (1996, 1998). *Liqueaction Resistance Of Soils. Summary Report From The 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop On Evaluation Of Liquefaction Resistance Soils*.