

STUDI POTENSI LIKUIFAKSI BERDASARKAN UJI PENETRASI STANDAR (SPT) DI PESISIR PANTAI BELANG MINAHASA TENGGARA

Roski R.I. Legrans

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi Manado

ABSTRAK

Likuifaksi adalah suatu peristiwa dimana pasir jenuh pada suatu waktu tertentu selama terjadi gempa mengalami kehilangan kekuatan geser sebagai akibat dari pertambahan tekanan air pori. Berbagai metode telah dikembangkan oleh para ahli untuk menganalisis potensi likuifaksi, baik melalui penyelidikan di laboratorium maupun penyelidikan di lapangan, diantaranya adalah uji penetrasi standar (SPT). Studi ini menggunakan hasil uji penetrasi standar di pesisir pantai Belang untuk mengevaluasi potensi likuifaksi yang terjadi di lokasi tersebut. Perhitungan potensi likuifaksi menggunakan persamaan-persamaan yang disarankan oleh National Center For Earthquake Engineering Research (NCEER) USA, percepatan maksimum muka tanah terkecil berdasarkan Peta Hazard Gempa Indonesia 2010, dan pada gempa 5, 6 dan 7 pada skala Richter. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa likuifaksi pada pesisir pantai Belang terjadi pada kedalaman sampai dengan 7 m dari permukaan tanah saat gempa.

Kata kunci : likuifaksi, SPT, pantai Belang

1. Latar Belakang

Sejak terjadinya gempa bumi di Niigata Jepang dan Alaska pada tahun 1964 yang menyebabkan terjadinya likuifaksi pada lapisan pasir jenuh yang berakibat pada kerusakan struktur bangunan atas, para ahli telah melakukan berbagai penelitian untuk mempelajari fenomena likuifaksi tersebut. Dari penelitian-penelitian tersebut dikembangkan metode-metode untuk mengevaluasi potensi likuifaksi. Metode-metode yang diusulkan untuk mengevaluasi potensi likuifaksi menggunakan data-data laboratorium dan data-data di lapangan. Untuk kepentingan desain yang bersifat lebih praktis, metode-metode yang berdasarkan data-data di lapangan lebih efisien dibandingkan metode-metode yang menggunakan data-data laboratorium.

Dewasa ini penggunaan data-data lapangan berdasarkan uji SPT dan CPT menjadi lebih populer, termasuk dalam mengevaluasi potensi likuifaksi seperti yang diusulkan oleh Seed dan Idriss, Seed dan de Alba, Castro, Valera dan Donovan, Robertson dan Campanella, Ishihara, Tokimatsu dan Yoshimi, Iwasaki, Shibata dan Teparaksa.

Pesisir pantai Belang yang terletak di Kabupaten Minahasa Tenggara Provinsi Sulawesi Utara, merupakan daerah pesisir pantai yang rawan gempa. Berdasarkan Peta Gempa Hazard Indonesia 2010, letak daerah pesisir Belang berada dekat *West Molucca Subduction*. Hal ini menyebabkan daerah pesisir Belang menjadi rentan terhadap gempa dan akibat dari gempa tersebut, seperti likuifaksi. Dengan memanfaatkan pengetahuan untuk mengevaluasi potensi likuifaksi,

studi potensi likuifaksi dilakukan di daerah pesisir pantai Belang berdasarkan uji penetrasi standar (SPT).

2. Konsep Dasar Likuifaksi

Menurut Seed (1979), likuifaksi adalah suatu kondisi dimana tanah akan mengalami deformasi yang kontinu pada tegangan sisa atau tahanan sisa yang rendah akibat terbentuknya tekanan air pori yang tinggi yang mengurangi tekanan efektif hingga menjadi sangat rendah. Peningkatan tekanan air pori yang menimbulkan likuifaksi dapat disebabkan oleh bekerjanya tegangan statis atau cyclic, dan kemungkinan terjadinya likuifaksi tergantung pada angka pori, kepadatan relatif dan tekanan total.

Syarat utama terjadinya likuifaksi antara lain adalah adanya beban dinamis yang bekerja pada lapisan jenuh air. Kondisi likuifaksi dapat terjadi pada kedalaman berapa saja asalkan kondisi-kondisi setempat dan getaran dari pembebanan yang diperlukan terjadi. Likuifaksi dapat juga terjadi bukan sebagai akibat langsung dari getaran tanah tetapi merupakan kelanjutan dari terjadinya likuifaksi pada lapisan pasir di bawahnya. Apabila terjadi likuifaksi pada suatu kedalaman tertentu, tekanan hidrostatis yang berlebihan pada daerah tersebut dihilangkan dengan adanya aliran air ke atas.

Pada dasarnya ada 2 (dua) konsep yang dapat digunakan untuk mengevaluasi potensi likuifaksi pada pasir jenuh akibat beban gempa, yaitu : 1). Konsep dimana parameter-parameter tanah ditentukan berdasarkan percobaan di lapangan dan/atau di laboratorium, dan parameter-parameter tersebut

dianggap konstan selama berlangsungnya gempa. Dengan kata lain, perubahan-perubahan parameter-parameter tanah diabaikan selama terjadinya gempa. Analisa untuk konsep ini bersifat statis; 2). Konsep dimana parameter-parameter tanah mengalami perubahan selama berlangsungnya gempa. Analisa untuk konsep ini bersifat dinamis. Berdasarkan konsep pertama dilakukan penelitian terhadap likuifaksi yang dikembangkan dari konsep peningkatan tekanan pori, konsep yang berdasarkan kekuatan geser pada keadaan tetap dengan kondisi tak berdrainasi dan pendekatan state parameter yang pada akhirnya melahirkan metode-metode evaluasi potensi likuifaksi.

Valera dan Donovan (1977) membagi metode-metode untuk menganalisa potensi likuifaksi menjadi 3 (tiga) kategori : 1). Metode dimana tegangan geser cyclic yang dihasilkan dalam lapisan pasir dan jumlah tertentu dari tegangan cyclic, didistribusi menurut waktu dan dihitung dengan metode yang sederhana. Metode pada kategori ini adalah yang disarankan oleh Seed dan Idriss, dimana tegangan geser yang menyebabkan likuifaksi dapat dihitung dari tegangan geser cyclic, τ_{av} yang dihasilkan pada setiap titik pada lapisan tanah, dinyatakan dengan rumus :

$$\tau = 0,65 \cdot \gamma \cdot z \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot r_d \quad \dots\dots\dots (1)$$

Dimana :

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

Faktor 0,65 merupakan asumsi bahwa tegangan geser seragam ekuivalen τ_{av} , adalah 65 % dari tegangan geser maksimum absolut yang dihasilkan oleh gempa.

2). Metode dimana tegangan cyclic yang dihasilkan dalam tanah dihitung dengan analisis respon tanah. Pada kategori ini, diperlukan data laboratorium untuk menganalisa ketahanan tanah, dan perhitungannya menggunakan program komputer sehingga diperoleh besarnya tegangan-tegangan geser dinamis beserta variasinya terhadap waktu. ; 3) Metode empiris yang didasarkan pada data-data lapangan. Dalam kategori ini, evaluasi potensi likuifaksi pada suatu lokasi ditinjau berdasarkan besaran gempa desain, tegangan yang dihasilkan akibat gempa dapat dihitung dengan persamaan τ di atas, dan dibandingkan dengan besarnya tegangan yang diperlukan untuk menimbulkan likuifaksi pada tanah yang diperoleh dari data-data lapangan seperti uji penetrasi standard (SPT) dan uji penetrasi kerucut (CPT). Untuk kategori ini, metode Seed dkk, metode Valera-Donovan, metode Castro, metode Tokimatsu-Yoshimi, metode Iwasaki dan

metode Shibata-Terapaksa adalah metode paling umum digunakan karena kepraktisannya.

3. Cyclic Stress Ratio (CSR) dan Cyclic Resistance Ratio (CRR)

Cyclic Stress Ratio (CSR) adalah tegangan geser cyclic seperti yang dijelaskan dalam persamaan (1). Variabel CSR direkomendasikan NCEER (1997) untuk menyeragamkan beragam variabel tegangan geser cyclic yang dikemukakan oleh masing-masing ahli geoteknik, seperti Seed-Harder, Youd dan Kramer. Dengan demikian persamaan (1) dapat ditulis :

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0,65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \cdot r_d \quad \dots\dots\dots (2)$$

σ_{vo} dan σ'_{vo} adalah tegangan vertikal *overburden* total dan tegangan vertikal *overburden* efektif. r_d adalah faktor reduksi tegangan yang menjelaskan fleksibilitas suatu profil tanah. Terdapat beberapa persamaan untuk menghitung r_d , diantaranya adalah yang dikemukakan oleh Iwasaki dkk (1981), Idriss (1999), Kayen (1992), Cetin dkk (2004), Liao-Whitman (1986) dan T.F. Blake (1996). Youd dan Idriss melalui NCEER (1997) menyarankan bahwa untuk penyelidikan rutin terhadap likuifaksi, nilai r_d dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Liao-Whitman (1986) yakni :

$$r_d = 1,0 - 0,00765z \quad (\text{untuk } z \leq 9, 15 \text{ m}) \quad \dots\dots\dots (3a)$$

$$r_d = 1,174 - 0,0267z \quad (\text{untuk } 9,15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m}) \quad \dots\dots (3b)$$

atau persamaan T.F. Blake (1996), yakni :

$$r_d = \frac{(1,000 - 0,4113z^{0,5} + 0,04052z + 0,001753z^{1,5})}{(1,000 - 0,4177z^{0,5} + 0,05729z - 0,006205z^{1,5} + 0,001210z^2)} \quad \dots\dots (4)$$

Kemampuan tanah untuk menahan likuifaksi disebut tegangan geser cyclic resisten, atau Cyclic Resistance Ratio yang digambarkan oleh variabel CRR (Youd dan Idriss, 1997). Nilai CRR dapat diperoleh lewat pengujian di laboratorium atau melalui hasil pengujian lapangan. Dikarenakan sulitnya mendapatkan nilai tegangan asli di lapangan yang sesuai dengan pengujian di laboratorium, dan pengambilan sampel tanah berbutir kasar melalui *boring* sering menjadi sampel tanah terganggu, sehingga nilai CRR yang dihitung berdasarkan hasil pengujian lapangan lebih disarankan untuk penyelidikan rutin terhadap likuifaksi. Beberapa pengujian lapangan tersebut adalah uji penetrasi standard (SPT), uji penetrasi konus atau sondir (CPT), perhitungan kecepatan gelombang geser (V_s) dan uji penetrasi Becker (BPT). Dari keempat pengujian tersebut, hasil pengujian SPT dan CPT lebih disarankan untuk digunakan pada evaluasi ketahanan terhadap likuifaksi (Youd dan Idriss, 1997).

Tabel 1. Keuntungan dan Kerugian Beberapa Pengujian Lapangan untuk Asesmen Ketahanan Likuifaksi

Feature (1)	Test Type			
	SPT (2)	CPT (3)	V _s (4)	BPT (5)
Past measurements at liquefaction sites	Abundant	Abundant	Limited	Sparse
Type of stress-strain behavior influencing test	Partially drained, large strain	Drained, large strain	Small strain	Partially drained, large strain
Quality control and repeatability	Poor to good	Very good	Good	Poor
Detection of variability of soil deposits	Good for closely spaced tests	Very good	Fair	Fair
Soil types in which test is recommended	Nongravel	Nongravel	All	Primarily gravel
Soil sample retrieved	Yes	No	No	No
Test measures index or engineering property	Index	Index	Engineering	Index

(sumber : Youd dan Idriss, 1997)

Jika menggunakan hasil uji penetrasi standar (SPT), maka untuk mendapatkan nilai CRR harus dilakukan koreksi dengan persamaan :

$$(N_1)_{60} = N_m C_N C_E C_B C_R C_S \dots\dots\dots (5)$$

Dimana : N_m = nilai SPT lapangan, C_N = faktor koreksi terhadap tekanan efektif overburden, C_E = faktor koreksi terhadap rasio energy hammer SPT, C_B = faktor koreksi terhadap diameter lubang bor SPT, C_R = faktor koreksi terhadap panjang batang SPT, dan C_S = faktor koreksi terhadap pengambilan sampel. Nilai-nilai faktor koreksi dapat dilihat pada Tabel 2.

Faktor koreksi terhadap tekanan efektif overburden dapat menggunakan persamaan Liao-Whitman (1986) :

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0,5} \dots\dots\dots (6)$$

Atau menggunakan persamaan Seed-Idriss (1982) :

$$C_N = \frac{2,2}{\left(1,2 + \frac{\sigma'_{vo}}{P_a} \right)} \dots\dots\dots (7)$$

Dimana : σ'vo = tekanan efektif overburden; P_a adalah tekanan atmosfer, yakni 100 kPa (1 atm). Idriss dan Seed mengemukakan jika kandungan butir halus

(fines content) diperhitungkan terhadap nilai CRR, maka nilai (N₁)₆₀ harus dikoreksi terhadap nilai ekuivalen pasir bersih dengan menggunakan persamaan :

$$(N_1)_{60CS} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \dots\dots\dots (8)$$

Dimana α dan β adalah koefisien yang ditentukan melalui persamaan-persamaan berikut :

$$\alpha = 0 \text{ (untuk } FC \leq 5\%) \dots\dots\dots (9a)$$

$$\alpha = \exp[1,76 - (190/FC^2)] \text{ (untuk } 5\% < FC < 35\%) \dots\dots\dots (9b)$$

$$\alpha = 5 \text{ (untuk } FC \geq 35\%) \dots\dots\dots (9c)$$

$$\beta = 1,0 \text{ (untuk } FC \leq 5\%) \dots\dots\dots (10a)$$

$$\beta = [0,99 + (FC^{1,5}/1,000)] \text{ (untuk } 5\% < FC < 35\%) \dots\dots\dots (10b)$$

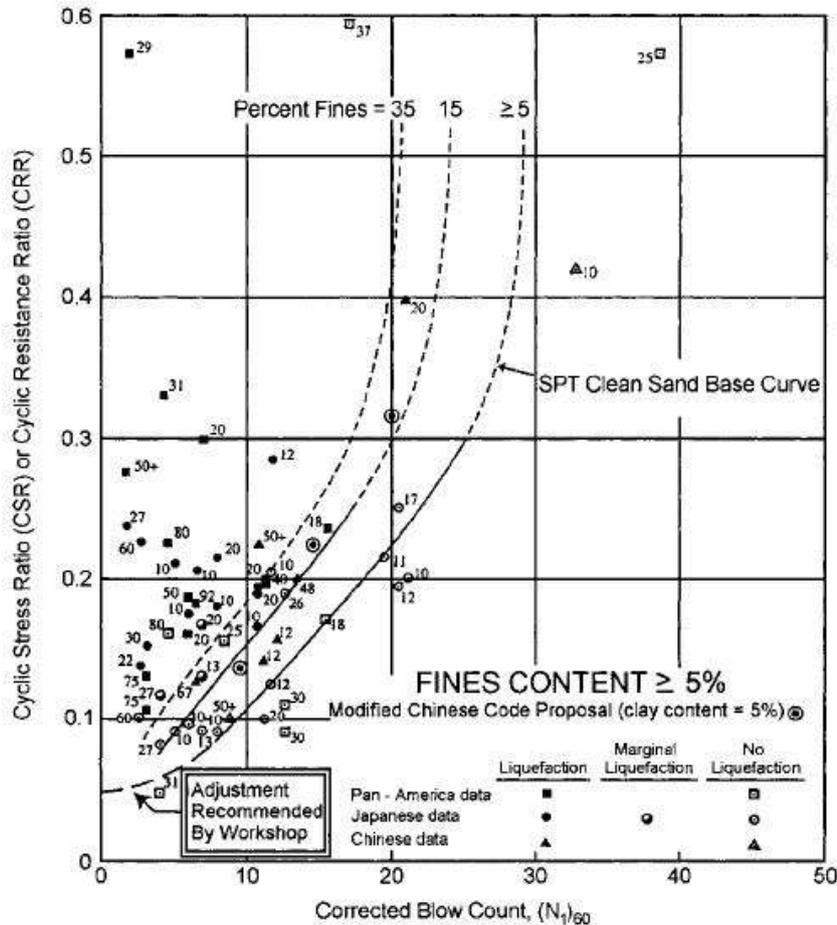
$$\beta = 1,2 \text{ (untuk } FC \geq 35\%) \dots\dots\dots (10c)$$

Dimana : FC = persen lolos saringan no. 200. Persamaan-persamaan (8) s/d (10) dapat digunakan pada perhitungan rutin ketahanan terhadap likuifaksi (Youd dan Idriss, 1997). Nilai CRR pada gempa 7,5 skala Richter dapat ditentukan melalui kurva SPT pasir bersih pada chart hubungan nilai SPT terkoreksi (N₁)₆₀ terhadap CRR menurut Seed dkk (1985).

Tabel 2. Faktor Koreksi Terhadap SPT (menurut Skempton)

Factor (1)	Equipment variable (2)	Term (3)	Correction (4)
Overburden pressure	—	C _N	(P _a /σ'vo) ^{0,5}
Overburden pressure	—	C _N	C _N ≤ 1.7
Energy ratio	Donut hammer	C _E	0.5–1.0
Energy ratio	Safety hammer	C _E	0.7–1.2
Energy ratio	Automatic-trip Donut-type hammer	C _E	0.8–1.3
Borehole diameter	65–115 mm	C _B	1.0
Borehole diameter	150 mm	C _B	1.05
Borehole diameter	200 mm	C _B	1.15
Rod length	<3 m	C _R	0.75
Rod length	3–4 m	C _R	0.8
Rod length	4–6 m	C _R	0.85
Rod length	6–10 m	C _R	0.95
Rod length	10–30 m	C _R	1.0
Sampling method	Standard sampler	C _S	1.0
Sampling method	Sampler without liners	C _S	1.1–1.3

(sumber : Youd dan Idriss, 1997)



Gambar 1. Kurva SPT Pasir Bersih Pada Gempa 7,5 Skala Richter (modifikasi oleh Seed dkk, 1985)

Selain menggunakan kurva pasir bersih pada Gambar 1, nilai $CRR_{7,5}$ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang dikemukakan oleh A.F. Rauch, yakni :

$$CRR_{7,5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60CS}} + \frac{(N_1)_{60CS}}{135} + \frac{50}{[10 \cdot (N_1)_{60CS} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (11)$$

Pada skala gempa selain 7,5, nilai CRR dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$CRR = CRR_{7,5} \cdot K_\sigma \cdot MSF \quad (12)$$

Dimana : $CRR_{7,5}$ = CRR pada 7,5 skala Richter, K_σ = faktor koreksi overburden, MSF = faktor skala gempa. Faktor koreksi overburden dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$K_\sigma = \left(\frac{\sigma_{vo}}{P_a} \right)^f \quad (13)$$

f adalah faktor kerapatan relatif tanah, dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$f = 0,831 - \frac{(N_1)_{60CS}}{160} \quad (14)$$

MSF (*Magnitude Scaling Factor*) adalah faktor skala gempa yang dikemukakan pertama kali oleh Seed dan Idriss pada tahun 1982 disebabkan sulitnya

membedakan kondisi likuifaksi dan non-likuifaksi pada perhitungan CRR untuk gempa selain 7,5 skala Richter. MSF dapat dihitung dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut :

$$MSF = 2,5 - 0,2M \quad (\text{Tokimatsu-Seed, 1987}) \quad (15a)$$

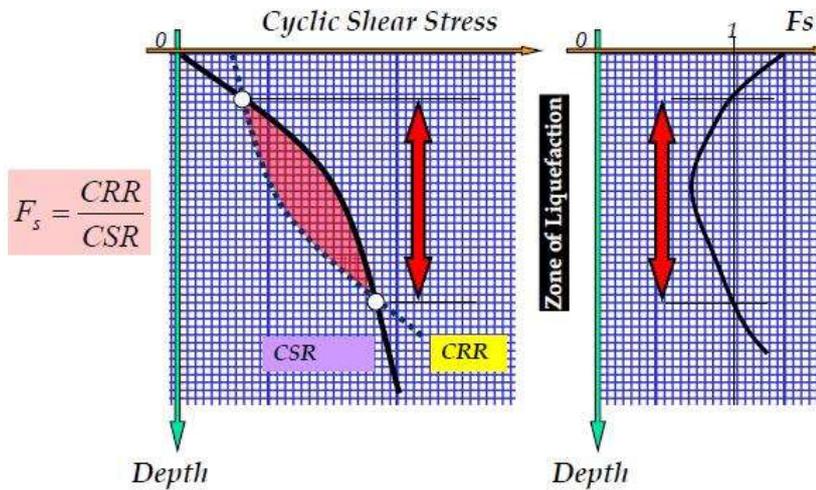
$$MSF = 6,9 \exp\left(-\frac{M}{4}\right) - 0,058 \quad (\text{IdrissBoulanger, 2008}) \quad (15b)$$

$$MSF = \frac{10^{2,24}}{M^{2,56}} \quad (\text{Revisi MSF Idriss, 1997}) \quad (15c)$$

$$MSF = \frac{174}{M^{2,56}} \quad (\text{Robertson, 1997}) \quad (15d)$$

Suatu lapisan tanah dikatakan berpotensi mengalami likuifaksi apabila faktor keamanan terhadap likuifaksi lebih kecil dari 1, yang dinyatakan melalui persamaan berikut :

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (16)$$



Gambar 2. Zona Likuifaksi Pada Lapisan Tanah

4. Metode Penulisan

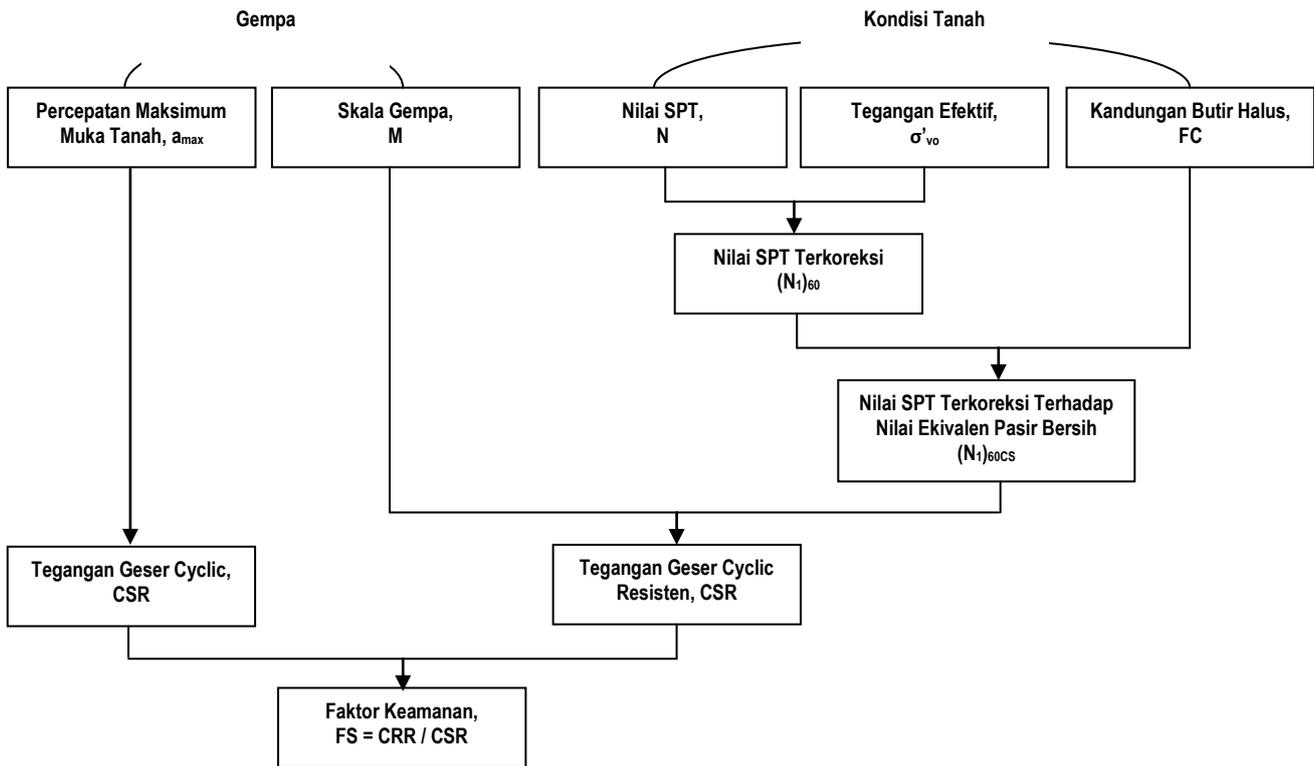
Wilayah studi adalah pesisir pantai Belang yang merupakan daerah pantai terbuka yang berdekatan dengan daerah permukiman nelayan dan pelabuhan ikan, dan berada pada wilayah administrasi Kabupaten Minahasa Tenggara Provinsi Sulawesi Utara. Topografi pantai adalah landai dengan kemiringan antara 0-1% (Nelwan, 2015). Berdasarkan Gambar 2 Peta Tektonik dan Sesar Aktif di Indonesia dalam Peta Hazard Gempa Indonesia 2010, daerah pesisir pantai Belang berada

dekat dengan *West Molucca Subduction*. Analisa potensi likuifaksi di pesisir pantai Belang menggunakan data hasil uji penetrasi standar (SPT) yang telah dilakukan sebelumnya pada pekerjaan penyelidikan tanah untuk pekerjaan pembangunan dermaga pelabuhan Belang (Nelwan, 2015). Muka air tanah berada pada kedalaman 7 m. Hasil uji penetrasi standar tersebut disajikan pada Tabel 3. Prosedur perhitungan potensi likuifaksi dilakukan menurut diagram alir pada Gambar 3.

Tabel 3. Hasil Uji Penetrasi Standar (SPT-N)

Lapisan	Kedalaman (m)	Jenis Tanah	N _{SPT}	γ (kN/m ³)
1	1	Fine Sand	3	14,0
2	3		5	14,0
3	5		2	14,0
4	7		11	16,0
5	9		15	16,0
6	11		22	16,0
7	13		53	20,5
8	15		60	20,5
9	17		60	20,5
10	19		60	20,5
11	21	Clayey Fine Sand	24	18,0
12	23		37	20,0

(sumber : Nelwan, 2015)



Gambar 3. Diagram Alir Perhitungan Potensi Likuifaksi

Nilai berat volume pada tiap lapisan tanah diperoleh berdasarkan korelasi nilai SPT (SPT-N) terhadap berat volume pada tiap lapisan. Faktor-faktor koreksi yang digunakan untuk perhitungan koreksi hasil SPT diambil berdasarkan alat SPT yang digunakan, yakni $ER = 0,78$; $C_B=C_R=C_S= 1$ (Nelwan, 2015). Nilai percepatan maksimum muka tanah dihitung dengan menggunakan persamaan menurut Peta Hazard Gempa Indonesia 2010, yakni :

$$a_{max} = PGA_M = F_{PGA} \times S_{PGA} \dots\dots\dots (17)$$

Perhitungan a_{max} mengacu pada Gambar 3, Gambar 6 dan Gambar 9 pada Peta Gempa Hazard Indonesia 2010 yang bersesuaian dengan lokasi daerah pesisir pantai Belang. Kandungan butir halus (FC) yang merupakan persentasi lolos saringan no. 200 dari tiap lapisan tanah tidak tersedia dari hasil penyelidikan tanah. Untuk menganalisa potensi likuifaksi, kandungan butir halus pada tiap lapisan tanah diasumsi sama untuk seluruh lapisan tanah yang ditinjau. Langkah-langkah perhitungan potensi likuifaksi adalah sebagai berikut :

1. Tentukan nilai berat volume, γ pada tiap lapisan tanah menurut korelasi nilai SPT (SPT-N) terhadap berat volume pada tiap lapisan.
2. Hitungan tegangan *overburden*, σ_{vo} dan tegangan efektif *overburden*, σ'_{vo} .

3. Hitung faktor reduksi tegangan, r_d yang sesuai dengan kedalaman lapisan tanah dengan menggunakan persamaan (3).
4. Tentukan percepatan maksimum muka tanah, a_{max} . Dalam studi ini, nilai a_{max} dihitung dengan menggunakan persamaan (17) dan mengacu pada Peta Gempa Hazard Indonesia 2010.
5. Hitung tegangan geser cyclic (CSR) pada setiap lapisan tanah dengan menggunakan persamaan (2).
6. Hitung faktor koreksi terhadap *overburden*, C_N pada setiap lapisan tanah dengan menggunakan persamaan (7).
7. Hitung nilai SPT-N terkoreksi dengan menggunakan persamaan (5) dan faktor-faktor koreksi sesuai alat SPT yang digunakan pada tiap lapisan tanah.
8. Hitung nilai SPT-N terkoreksi terhadap nilai ekuivalen pasir bersih dengan menggunakan persamaan (8). Tentukan nilai FC pada tiap lapisan tanah. Hitung koefisien-koefisien kandungan butir halus sesuai FC pada tiap lapisan tanah dengan menggunakan persamaan (9)-(10).
9. Hitung tegangan geser cyclic resisten (CRR) pada gempa 7,5 skala Richter pada setiap lapisan tanah dengan menggunakan persamaan (11).

10. Tentukan skala gempa (M) yang lain untuk perhitungan CRR lain.
11. Hitung faktor koreksi *overburden*, K_o pada setiap lapisan tanah dengan menggunakan persamaan (13) dan (14).
12. Hitung faktor skala gempa (MSF) dengan menggunakan persamaan (15).
13. Hitung tegangan geser cyclic resisten (CRR) sesuai skala gempa yang telah ditentukan menurut langkah 10 pada setiap kedalaman tanah dengan menggunakan persamaan (12).
14. Hitung faktor keamanan terhadap likuifaksi untuk setiap lapisan tanah yang ditinjau dengan menggunakan persamaan (16).
15. Gambar zona potensi likuifaksi pada lapisan tanah menurut Gambar 2.

5. Hasil Dan Pembahasan

Untuk menghitung percepatan maksimum maksimum muka tanah (a_{max}) menurut Peta Hazard Gempa Indonesia 2010, kategori tanah pada lokasi studi harus diklasifikasikan menurut Tabel 2 Peta Hazard Gempa Indonesia berdasarkan N rata-rata. Perhitungan N rata-rata menggunakan persamaan berikut :

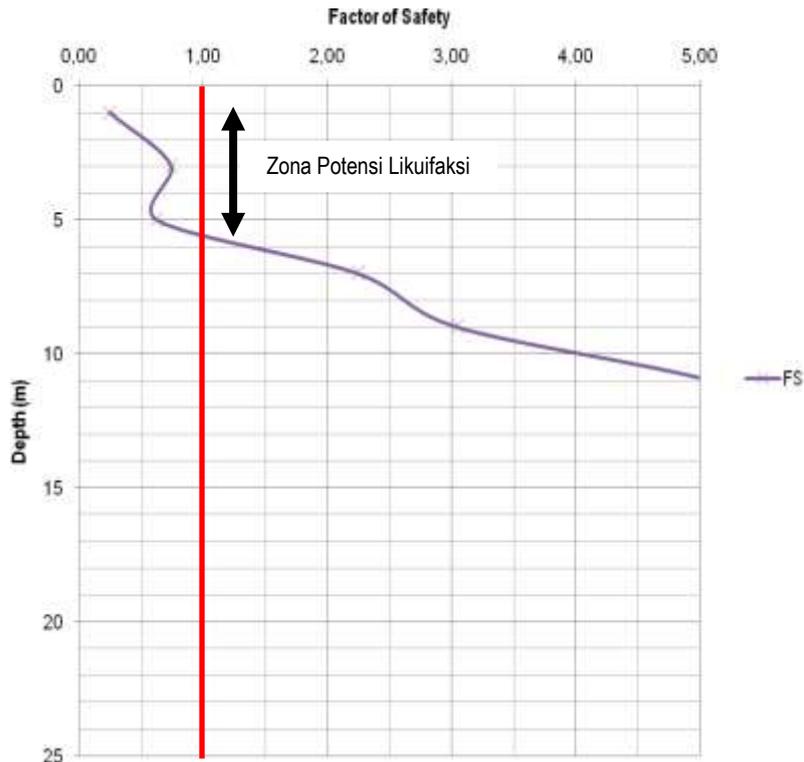
$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m t_i / N} \dots \dots \dots (18)$$

Dengan demikian diperoleh N rata-rata sebesar 10. Kategori tanah pada lokasi menurut Tabel 2 untuk N rata-rata = 10 adalah kategori tanah lunak. Tabel 3, Gambar 3, Gambar 6 dan Gambar 9 pada Peta Hazard Gempa Indonesia 2010 digunakan untuk menentukan faktor amplifikasi untuk PGA (F_{PGA}) dan Nilai PGA di batuan dasar (S_{PGA}). Untuk lokasi pesisir pantai Belang, diambil S_{PGA} rata-rata sebesar 0,225 g (Gambar 3), 0,275 g (Gambar 6) dan 0,35 g (Gambar 9). F_{PGA} untuk masing-masing S_{PGA} tersebut menurut kategori tanah lunak pada Tabel 3 adalah 1,7 , 1,2 dan 0,9. a_{max} dengan persamaan (17), diperoleh masing-masing 0,383 g (untuk $S_{PGA} = 0,225$ dan $F_{PGA} = 1,7$); 0,330 g (untuk $S_{PGA} = 0,275$ dan $F_{PGA} = 1,2$) dan 0,315 g (untuk $S_{PGA} = 0,35$ dan $F_{PGA} = 0,9$). a_{max} yang akan digunakan adalah yang terkecil yakni **0,315 g**.

Oleh karena tidak tersedianya kandungan butir halus berdasarkan hasil analisa saringan pada tiap lapisan tanah, maka nilai FC dianggap sama untuk seluruh lapisan tanah, dan diambil nilai FC = 5 %. Skala gempa pada skala Richter untuk mengevaluasi potensi likuifaksi diambil nilai M = 5, 6, dan 7. Magnitude Scaling Factor (MSF) dihitung menggunakan persamaan (15c) yang direkomendasikan oleh NCEER (Youd dan Idriss, 1997). Selengkapnya hasil perhitungan disajikan pada tabel-tabel berikut.

Tabel 4a. Perhitungan Faktor Keamanan Terhadap Likuifaksi Pada M = 5 dan $a_{max} = 0,315$ g

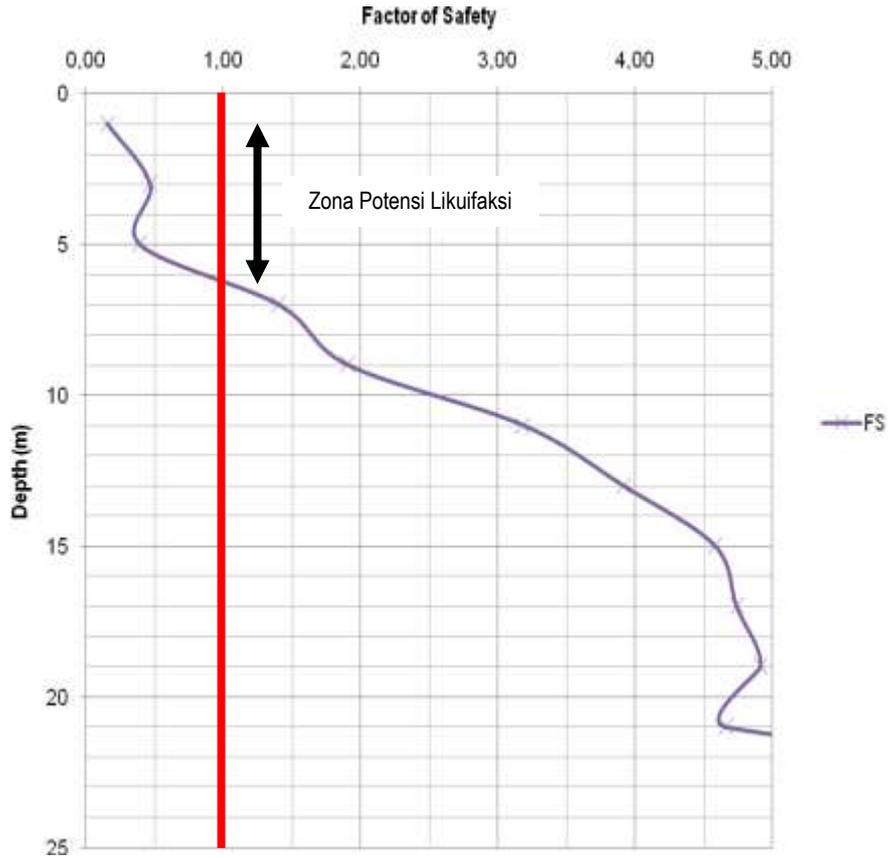
Lapisan	Kedalaman (m)	N_{SPT}	γ (kN/m ³)	rd	$\sigma_{vo} / \sigma'_{vo}$	CSR	CRR _{7,5}	CRR	FS	Evaluasi
1	1	3	14,0	0,9924	1,0000	0,2032	0,08287	0,0494	0,24	L
2	3	5	14,0	0,9771	1,0000	0,2001	0,10293	0,1482	0,74	L
3	5	2	14,0	0,9618	1,0000	0,1969	0,05843	0,1234	0,63	L
4	7	11	16,0	0,9465	1,0000	0,1938	0,15184	0,4349	2,24	TL
5	9	15	16,0	0,9312	1,1715	0,2234	0,19525	0,6797	3,04	TL
6	11	22	16,0	0,8803	1,3096	0,2360	0,30206	1,1983	5,08	TL
7	13	53	20,5	0,8269	1,3973	0,2366	0,36949	1,4763	6,24	TL
8	15	60	20,5	0,7735	1,4630	0,2317	0,39459	1,6922	7,30	TL
9	17	60	20,5	0,7201	1,5139	0,2232	0,35681	1,6869	7,56	TL
10	19	60	20,5	0,6667	1,5546	0,2122	0,32102	1,6622	7,83	TL
11	21	24	18,0	0,6133	1,6006	0,2010	0,21155	1,4961	7,44	TL
12	23	37	20,0	0,5599	1,6303	0,1869	0,39563	2,7833	14,89	TL



Gambar 4a. Zona Potensi Likuifaksi Pada $M = 5$ dan $a_{max} = 0,315 g$

Tabel 4b. Perhitungan Faktor Keamanan Terhadap Likuifaksi Pada $M = 6$ dan $a_{max} = 0,315 g$

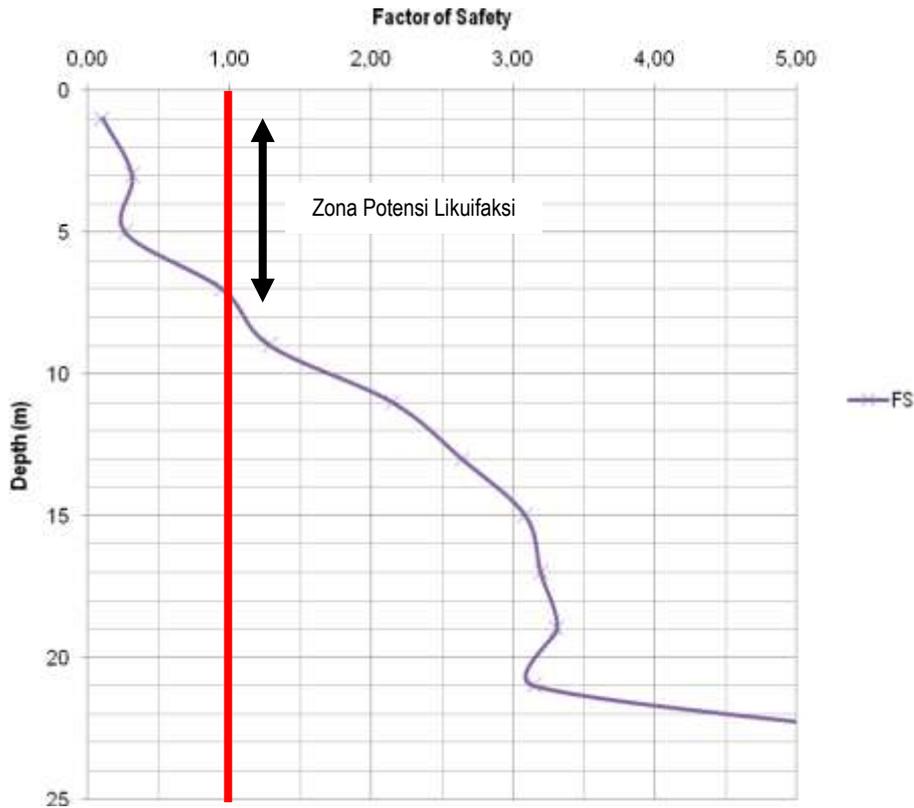
Lapisan	Kedalaman (m)	N _{SPT}	γ (kN/m ³)	rd	$\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}}$	CSR	CRR _{7,5}	CRR	FS	Evaluasi
1	1	3	14,0	0,9924	1,0000	0,2032	0,08287	0,0310	0,15	L
2	3	5	14,0	0,9771	1,0000	0,2001	0,10293	0,0929	0,46	L
3	5	2	14,0	0,9618	1,0000	0,1969	0,05843	0,0774	0,39	L
4	7	11	16,0	0,9465	1,0000	0,1938	0,15184	0,2727	1,41	TL
5	9	15	16,0	0,9312	1,1715	0,2234	0,19525	0,4262	1,91	TL
6	11	22	16,0	0,8803	1,3096	0,2360	0,30206	0,7514	3,18	TL
7	13	53	20,5	0,8269	1,3973	0,2366	0,36949	0,9257	3,91	TL
8	15	60	20,5	0,7735	1,4630	0,2317	0,39459	1,0611	4,58	TL
9	17	60	20,5	0,7201	1,5139	0,2232	0,35681	1,0577	4,74	TL
10	19	60	20,5	0,6667	1,5546	0,2122	0,32102	1,0423	4,91	TL
11	21	24	18,0	0,6133	1,6006	0,2010	0,21155	0,9381	4,67	TL
12	23	37	20,0	0,5599	1,6303	0,1869	0,39563	1,7452	9,34	TL



Gambar 4b. Zona Potensi Likuifaksi Pada $M = 6$ dan $a_{max} = 0,315 g$

Tabel 4c. Perhitungan Faktor Keamanan Terhadap Likuifaksi Pada $M = 7$ dan $a_{max} = 0,315 g$

Lapisan	Kedalaman (m)	N _{SPT}	γ (kN/m ³)	rd	$\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}}$	CSR	CRR _{7,5}	CRR	FS	Evaluasi
1	1	3	14,0	0,9924	1,0000	0,2032	0,08287	0,0209	0,10	L
2	3	5	14,0	0,9771	1,0000	0,2001	0,10293	0,0626	0,31	L
3	5	2	14,0	0,9618	1,0000	0,1969	0,05843	0,0522	0,26	L
4	7	11	16,0	0,9465	1,0000	0,1938	0,15184	0,1838	0,95	L
5	9	15	16,0	0,9312	1,1715	0,2234	0,19525	0,2872	1,29	TL
6	11	22	16,0	0,8803	1,3096	0,2360	0,30206	0,5064	2,15	TL
7	13	53	20,5	0,8269	1,3973	0,2366	0,36949	0,6239	2,64	TL
8	15	60	20,5	0,7735	1,4630	0,2317	0,39459	0,7151	3,09	TL
9	17	60	20,5	0,7201	1,5139	0,2232	0,35681	0,7128	3,19	TL
10	19	60	20,5	0,6667	1,5546	0,2122	0,32102	0,7024	3,31	TL
11	21	24	18,0	0,6133	1,6006	0,2010	0,21155	0,6322	3,15	TL
12	23	37	20,0	0,5599	1,6303	0,1869	0,39563	1,1762	6,29	TL



Gambar 4c. Zona Potensi Likuifaksi Pada $M = 7$ dan $a_{max} = 0,315$ g

Dari hasil perhitungan yang disajikan pada tabel-tabel di atas, likuifaksi mulai terjadi sampai dengan kedalaman 5 m dari permukaan tanah. Tabel 5 menunjukkan korelasi antara $(N_1)_{60}$ dengan kerapatan relatif pasir, D_r . Berdasarkan hasil SPT-N dan SPT terkoreksi $(N_1)_{60}$, lapisan-lapisan tersebut tergolong lapisan pasir dengan kerapatan lepas sampai sedang. Nilai kerapatan relatif berkisar antara 15% - 65%.

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium dan kasus-kasus likuifaksi yang pernah terjadi, angka pori awal (e_0) atau kerapatan relatif (D_r) adalah salah satu faktor yang berpengaruh terhadap terjadinya likuifaksi. Umumnya likuifaksi terjadi pada pasir bersih yang jenuh dan pasir berlanau dengan $D_r < 50\%$. Likuifaksi tidak akan terjadi jika pasir memiliki kerapatan relatif, $D_r > 75\%$. Distribusi ukuran butiran adalah faktor lain yang berpengaruh terhadap terjadinya likuifaksi.

Tsuchida (1970) menyarankan kurva distribusi ukuran butiran untuk membedakan tanah berpotensi likuifaksi dan tidak berpotensi likuifaksi. Tanah berbutir kasar yang mengandung kohesi cenderung mengikat partikel pasir sehingga menjadi lebih rapat dan mampu menahan likuifaksi. Studi ini mengasumsi bahwa kandungan butir halus (FC) pada seluruh lapisan adalah sama yakni sebesar 5%. Ini berarti bahwa lapisan tanah

yang ditinjau memiliki kohesi yang kecil untuk mengikat partikel pasir menjadi lebih padat sehingga cenderung mengalami likuifaksi. Kandungan butir halus yang merupakan persen lolos saringan no. 200 perlu diperiksa pada tiap lapisan yang ditinjau sehingga dapat diketahui dengan baik potensi tiap lapisan tanah terhadap likuifaksi. Hasil penyelidikan tanah yang digunakan dalam studi ini tidak menyediakan data kurva distribusi ukuran butiran pada tiap lapisan tanah yang dapat menjelaskan fraksi tanah pada tiap lapisan. Hasil perhitungan potensi likuifaksi dapat menjelaskan bahwa fraksi pada lapisan tanah yang mengalami likuifaksi adalah pasir dan pasir berlanau.

Untuk lapisan tanah pada kedalaman 21-23 m yang merupakan *clayey fine sand*, perlu diketahui indeks plastisitas (PI) dan rasio kadar air (w_c) terhadap batas plastis (LL). $PI < 12\%$ dan rasio $> 85\%$ cenderung berpotensi likuifaksi. Tekanan overburden merupakan faktor yang berpengaruh terhadap potensi likuifaksi. Semakin dalam suatu lapisan tanah semakin besar tekanan overburden semakin kecil berpotensi likuifaksi. Oleh karena itu, tanah yang berpotensi mengalami likuifaksi berada sampai kedalaman 15 m (Day, 2012). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kedalaman tanah

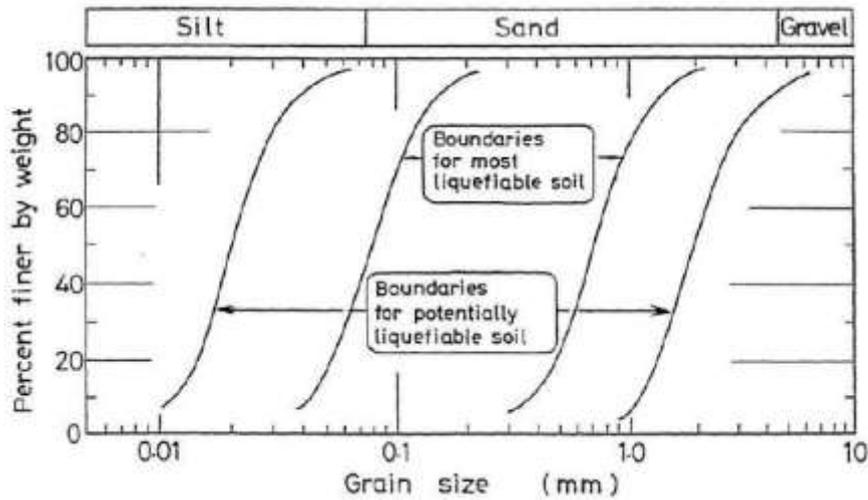
pada pesisir pantai Belang yang mengalami likuifaksi berada diantara 0 m s/d kedalaman 15 m. Ohsaki (1969), Seed (1979) dan Yoshimi dkk (1989) mengemukakan bahwa tanah sedimen yang jenuh cenderung berpotensi likuifaksi berdasarkan usia

endapannya (Tabel 6). Tabel 6 dapat memperkuat hasil perhitungan bahwa daerah pesisir pantai cenderung mengalami likuifaksi jika endapan pasir jenuh berusia < 500 tahun.

Tabel 5. Korelasi Antara $(N_1)_{60}$ Dan Kerapatan Relatif (D_r)

$(N_1)_{60}$ (blows per foot)	Sand density	Relative density D_r , percent
0-2	Very loose condition	0-15
2-5	Loose condition	15-35
5-20	Medium condition	35-65
20-35	Dense condition	65-85
Over 35	Very dense condition	85-100

(sumber : Tokimatsu dan Seed, 1987)



Gambar 5. Kurva Gradasi Untuk Tanah Likuifaksi Dan Non-Likuifaksi (Tsuchida, 1970)

Tabel 6. Perkiraan Likuifaksi Pada Tanah Deposit Berdasarkan Umur Geologi Tanah Dan Lingkungan Sekitar Endapan

Type of deposit	General distribution of cohesionless sediments in deposits	Likelihood that cohesionless sediments, when saturated, would be susceptible to liquefaction (by age of deposit)			
		<500 years	Holocene	Pleistocene	Pre-Pleistocene
(a) Continental deposits					
Alluvial fan and plain	Widespread	Moderate	Low	Low	Very low
Delta and fan-delta	Widespread	High	Moderate	Low	Very low
Dunes	Widespread	High	Moderate	Low	Very low
Marine terrace/plain	Widespread	Unknown	Low	Very low	Very low
Talus	Widespread	Low	Low	Very low	Very low
Tephra	Widespread	High	High	Unknown	Unknown
Colluvium	Variable	High	Moderate	Low	Very low
Glacial till	Variable	Low	Low	Very low	Very low
Lacustrine and playa	Variable	High	Moderate	Low	Very low
Loess	Variable	High	High	High	Unknown
Floodplain	Locally variable	High	Moderate	Low	Very low
River channel	Locally variable	Very high	High	Low	Very low
Sabka	Locally variable	High	Moderate	Low	Very low
Residual soils	Rare	Low	Low	Very low	Very low
Tuff	Rare	Low	Low	Very low	Very low
(b) Coastal zone					
Beach—large waves	Widespread	Moderate	Low	Very low	Very low
Beach—small waves	Widespread	High	Moderate	Low	Very low
Delta	Widespread	Very high	High	Low	Very low
Estuarine	Locally variable	High	Moderate	Low	Very low
Foreshore	Locally variable	High	Moderate	Low	Very low
Lagoonal	Locally variable	High	Moderate	Low	Very low

(sumber : Day, 2012)

DAFTAR PUSTAKA

- Anonymous. (2014) : Settle 3D Liquefaction Theory Manual. *Rocscience Inc.*
- Bouwlanger R.W. (2009) : Soil Liquefaction during Earthquakes – The Cliff Notes Version. *Seminar for the California Geoprofessional Association*. Irvine, California.
- Day Robert W. (2012) : Geotechnical Earthquake Engineering Handbook – With The 2012 International Building Code, 2nd Edition. *The McGraw-Hill Companies, Inc.* United States.
- Geotechnical Engineering Bureau. (2015) : Geotechnical Design Procedure : Liquefaction Potential of Cohesionless Soils, GDP-9, Revision #3. *State of New York. Departmen of Transportation.*
- Iwasaki T., Tokida K., Tatsuoka F. (1981) : Soil Liquefaction Potential Evaluation with Use of the Simplified Procedure. *Proceedings : First International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri.
- Nelwan K. S. V. (2015) : Analisis Kelelahan Struktur Pada Tiang Pancang Di Dermaga Belang Dengan Metode Fracture Mechanics. *Skripsi*. Universitas Sam Ratulangi Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil. Manado.
- Peta Hazard Gempa Indonesia 2010. *Kementerian Pekerjaan Umum*. Jakarta.
- Prakash S., Puri V.K. (2010) : Recent Advances in Liquefaction of Fine Grained Soils. *Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium in Honor of Professor I.M. Idriss*, San Diego, California.
- Youd T.L., 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*, April 2001, 297-313.
- Youd T.L., Idriss I.M. (1997) : Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, ISSN 1088-3800. *Technical Report NCEER-97-0022*. Utah.