

ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI PADA PESISIR PULAU OBA, MALUKU UTARA (ANALYSIS OF LIQUEFACTION POTENTIAL IN OBA ISLAND COAST, NORTH MALUKU)

Farras Puti Dzakhirah¹⁾, Sri Wulandari²⁾

^{1),2)}Universitas Gunadarma

^{1),2)}Jl. Margonda Raya No.100, Pondok Cina, Kecamatan Beji, Kota Depok, Jawa Barat 16424

e-mail: ¹⁾farrasdzakhirah13@gmail.com, ²⁾sri_wulandari@staff.gunadarma.ac.id

Diterima: 12 Maret 2020; direvisi: 15 Juni 2020; disetujui: 23 Juni 2020.

ABSTRAK

Likuifaksi adalah suatu proses atau kejadian berubahnya sifat tanah dari keadaan padat menjadi keadaan cair, yang disebabkan oleh beban siklik pada waktu terjadi gempa. Berbagai metode telah dikembangkan oleh para ahli untuk menganalisis potensi likuifaksi, baik melalui penyelidikan di laboratorium seperti uji analisa saringan dan berat volume tanah, maupun penyelidikan di lapangan, diantaranya adalah SPT dan CPT. Studi ini menggunakan hasil uji lapangan SPT dan uji laboratorium di pesisir pulau Oba, pada bangunan Packing Plant Maluku Utara untuk mengevaluasi potensi likuifaksi yang terjadi di lokasi tersebut karena berdasarkan Buku Peta Gempa 2017 daerah studi merupakan wilayah yang rawan gempa dengan percepatan gempa batuan dasar 0,4-0,5 g. Perhitungan potensi likuifaksi menggunakan metode deterministik Idriss-Boulanger dan Tsuchida, percepatan maksimum muka tanah dihitung berdasarkan Peta Hazard Gempa Indonesia 2010. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa potensi likuifaksi pada studi lokasi terjadi pada kedalaman yang memiliki kepadatan tanah yang rendah dan kondisi jenuh air. Tanah yang memiliki potensi likuifaksi terjadi saat kekuatan tanah kurang dari beban gempa yang terjadi ($CRR < CSR$), ditunjukkan dengan nilai faktor keamanan $FK < 1$ dan berdasarkan uji laboratorium tanah ini digolongkan sebagai tanah bergradasi buruk. Analisis potensi likuifaksi mengindikasikan bahwa ketebalan lapisan tanah yang berpotensi terlikuifaksi bervariasi antara 6 meter dan 14 meter saat gempa terjadi dengan nilai magnitudo minimum yang bervariasi.

Kata Kunci: likuifaksi, SPT, deterministik, idriss-boulanger, tsuchida.

ABSTRACT

Liquefaction is a process or event that changes its nature from a solid to a liquid state, which is caused by cyclic loads during an earthquake. Various methods have been developed by experts to analyze the potential of liquefaction, both through investigations in the laboratory (sieve analysis test and unit weight) and in the field, SPT and CPT. This study uses the results of SPT field tests and laboratory tests on the coast of Oba island, in the North Maluku Packing Plant building to evaluate the potential liquefaction that occurs at that location because based on the 2017 Earthquake Map Book the study area is an earthquake-prone with a bedrock earthquake 0,4 – 0,5 g. Calculation of liquefaction potential using the deterministic method of Idriss-Boulanger and Koester & Tsuchida, the maximum acceleration of the land surface is calculated based on the 2010 Indonesian Earthquake Hazard Map. Calculation results show that liquefaction potential in location studies occurs at depths that have low soil density and in water saturation conditions. Soil that has a liquefaction potential occurs when the soil strength is less than the earthquake load ($CRR < CSR$), indicated by the safety factor value, $FK < 1$ and based on laboratory tests this soil is classified as poorly graded soil. Analysis of liquefaction potential related to the thickness of the layer approved by the liquefaction varies between 6 and 14 meters when an earthquake occurs with varying minimum magnitude values.

Keywords: liquefaction, SPT, deterministic, idriss-boulanger, tsuchida.

PENDAHULUAN

Wilayah Maluku Utara adalah salah satu wilayah teraktif dalam hal kegempaan di Indonesia terutama di wilayah Laut Maluku. Ada beberapa lempeng yang mempengaruhi kondisi Maluku Utara sendiri, yaitu lempeng dunia Eurasia, lempeng oceanic Laut Maluku, lempeng pasifik, dan lempeng Filipina. Selain itu terdapat sesar Sangihe dan sesar Halmahera yang bergerak dan mempengaruhi beberapa daerah yang selama ini jarang gempa.

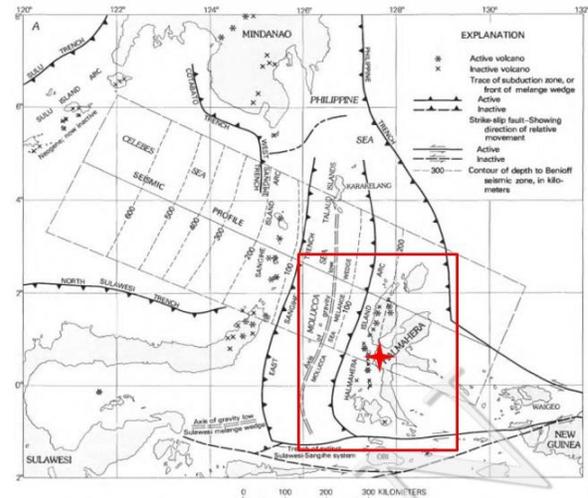
Likuifaksi adalah suatu proses atau kejadian berubahnya sifat tanah dari keadaan padat menjadi keadaan cair, yang disebabkan oleh beban siklik pada waktu terjadi gempa sehingga tekanan air pori meningkat mendekati atau melampaui tegangan vertikal. Likuifaksi terjadi ketika tanah non-koheusif (lanau sampai pasir) jenuh air yang kehilangan kuat gesernya pada saat mengalami guncangan terutama oleh gempa. Selama diguncang terjadilah likuifaksi yang membahayakan bangunan di atasnya.

Beberapa metode untuk mengevaluasi likuifaksi telah dikembangkan oleh para ahli geoteknik. Metode yang sudah ada terus dilakukan koreksi dan penyempurnaan guna mendapatkan prosedur sederhana yang memudahkan praktisi dalam menganalisis kondisi lapangan.

Analisis menggunakan metode deterministik, hasil analisis dan evaluasinya berupa kesimpulan terjadi atau tidak terjadinya likuifaksi yang diinterpretasikan melalui besarnya angka keamanan terhadap bahaya likuifaksi.

Penelitian ini mengambil studi kasus pada bangunan *Packing Plant* dengan titik koordinat 0.72°N , 127.55°E . Bangunan ini terletak di daerah pesisir yang dibangun di atas tanah berpasir dan

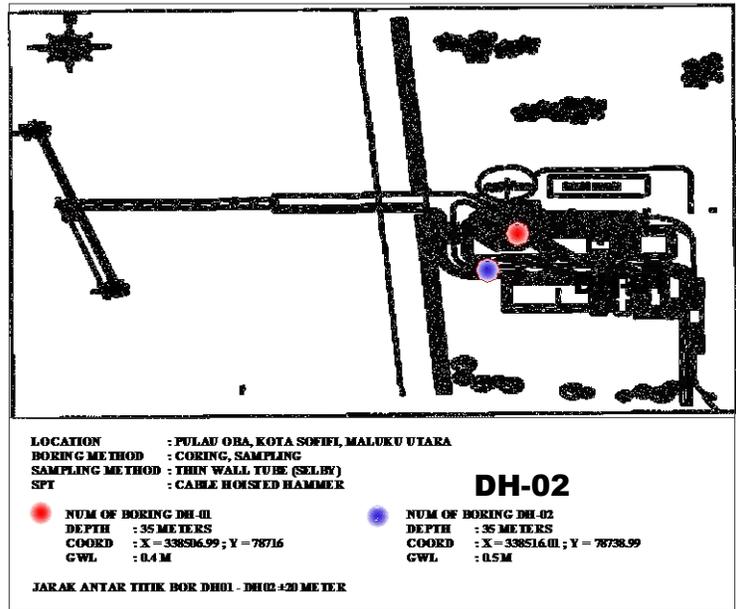
memiliki muka air tanah yang dangkal. Lokasi penelitian yang terletak dekat dengan sesar aktif Halmahera dan juga dekat dengan gunung berapi aktif, menjadikan lokasi ini sebagai wilayah yang rawan gempa. Oleh karena itu tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui zona kedalaman tanah yang berpotensi likuifaksi, mengingat kondisi tanah dan kondisi kegempaan wilayah studi yang berpotensi terhadap likuifaksi.



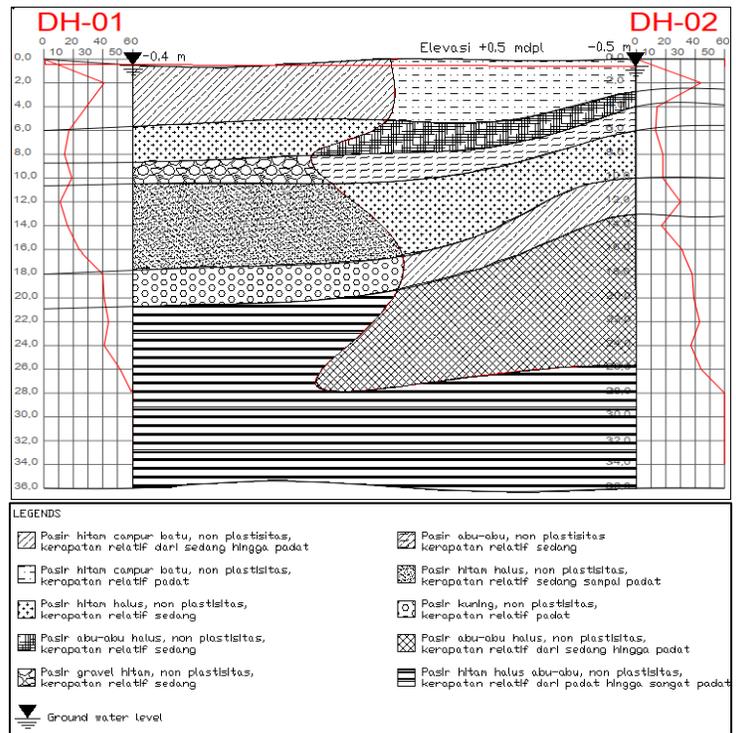
Gambar 1. Kondisi tektonik dan vulkanik Halmahera

Kondisi Tanah di Lokasi Penelitian

Hasil pemboran teknik menunjukkan bahwa lapisan bawah permukaan tanah terdiri dari tanah pasir dengan kepadatan sedang sampai padat. Kedalaman muka air tanah untuk masing-masing titik DH-01 dan DH-02 adalah 0,4 m dan 0,5 m. Kondisi stratigrafi bawah permukaan dataran lokasi studi dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Lokasi titik-titik penyelidikan tanah lapangan



Gambar 3. Profil perkiraan stratigrafi tanah pengeboran

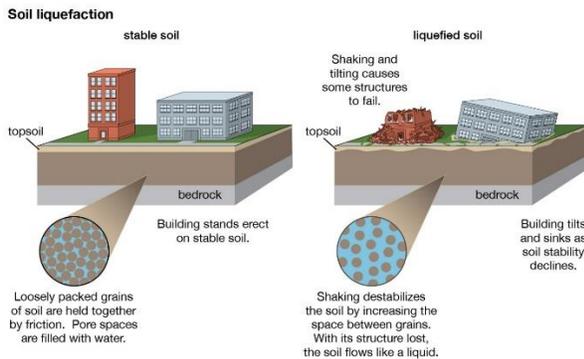
Tabel 1. Data SPT

Bore Hole	Depth (m)	N	Fines Content	Berat Volume Tanah (kN/m ³)	Dr
DH-01	2	41	17,60%	17,946	50,3%
	4	29	17,60%	17,946	50,3%
	6	17	17,60%	17,946	50,3%
	8	14	19,00%	17,260	50,0%
	10	19	12,60%	17,456	50,0%
	12	11	20,20%	18,044	50,0%
	14	16	20,20%	18,044	50,0%
DH-02	2	44	17,20%	18,436	40,64%
	4	14	20,00%	17,358	55,14%
	6	13	19,60%	17,652	55,14%
	8	18	21,10%	17,946	50,22%
	10	18	21,10%	17,946	50,22%
	12	30	18,00%	18,829	47,78%
	14	17	18,70%	20,692	49,66%
	16	31	18,70%	20,692	49,66%

KAJIAN PUSTAKA

Likuifaksi

Likuifaksi adalah hilangnya kekuatan tanah akibat kenaikan tegangan air pori yang timbul akibat beban siklis (Masyhur, 2006). Menurut Robert (2002), Likuifaksi merupakan proses penambahan tekanan air pori akibat adanya getaran dan desakan air yang mengubah sifat pasir menjadi kondisi cair. Dalam keadaan ini, tegangan efektif adalah nol akibat penambahan tekanan air pori yang mendekati atau sama dengan tegangan vertikal atau tegangan total.



© 2012 Encyclopedia Britannica, Inc.

Sumber : Britannica 2012

Gambar 4. Peristiwa Likuifaksi

Berdasarkan Seed et al. (1975), likuifaksi adalah suatu proses perubahan kondisi tanah pasir

yang jenuh air menjadi cair, akibat meningkatnya tegangan air pori yang harganya sama dengan tegangan total tanah disebabkan terjadinya beban dinamik akibat gempa bumi tektonik, sehingga tegangan efektif tanah menjadi nol.

Likuifaksi biasanya terjadi pada jenis pasir lepas atau *loose sand* dan berada dekat dengan muka air tanah. Akibat adanya getaran yang sangat cepat, maka air akan mulai mendesak partikel tanah dan menyebabkan tanah menjadi jenuh air dan tegangan total sepenuhnya adalah tekanan air pori.

Ketika likuifaksi terjadi, maka tanah akan berada pada kondisi cair dan kehilangan kekuatan untuk mendukung beban struktur dan struktur akan amblas kedalam tanah dan struktur yang ditanam di tanah akan mengapung dan muncul di permukaan tanah.

Tegangan Geser Rata-rata Akibat Gempa

Beban gempa merupakan beban siklik sehingga tegangan geser tanah pasir akibat gempa juga berubah-ubah menurut fluktuasi percepatan tanah. Pada percepatan tanah maksimum maka akan terjadi tegangan geser maksimum dan seterusnya. Menurut hasil uji tegangan geser rata-rata τ_{av} dengan suatu hubungan, (Pawirodikromo 2012)

$$\tau_{av} = 0,65 \cdot \tau_{d,maks} = 0,65 \cdot \sigma_{vo} \cdot \frac{a_{maks}}{g} \cdot r_d \dots\dots\dots(1)$$

Dengan σ_{vo} adalah tegangan total *overburden*, a_{maks} adalah percepatan maksimum tanah akibat gempa, r_d adalah faktor reduksi tegangan dan g adalah percepatan gravitasi.

Simplified Method (SPT)

1. Stress Reduction Factor (rd)

Analisis potential likuifaksi oleh Seed dan Idriss (1971) bermula dari asumsi gerakan *rigid body motion* massa tanah. Namun demikian tanah tidak merupakan *rigid body* tetapi lebih bersifat *flexible body*. Oleh karena itu terdapat koreksi tegangan tanah yang ditunjukkan oleh *stress-reduction factor* (r_d). Terdapat beberapa versi rumusan *stress-reduction factor* (r_d) namun bentuk rumusan yang paling sederhana adalah (Pawirodikromo 2012)

$$r_d = 1 - 0,00765 z, \quad z < 9,15 \text{ m} \dots\dots\dots(2)$$

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

Dimana z adalah kedalaman lapisan tanah yang ditinjau.

2. Cyclic Stress Ratio (CSR)

Tegangan geser rata-rata τ_{av} , akibat gempa bumi telah dirumuskan secara jelas sebagaimana disajikan pada persamaan 1. Apabila tegangan geser rata-rata τ_{av} dinormalisasikan dengan *effective overburden pressure* σ'_{vo} maka akan menjadi *cyclic stress ratio* (CSR), (Pawirodikromo 2012)

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0,65 \cdot \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \cdot \frac{a_{maks}}{g} \cdot r_d \quad (4)$$

Cyclic Stress Ratio (CSR) pada hakekatnya adalah normalisasi tegangan lapisan tanah yang diakibatkan oleh gempa bumi dengan percepatan tanah amaks. CSR untuk seterusnya akan berfungsi sebagai *stress normalization demand*. Mengingat CSR merupakan fungsi langsung dari *total overburden pressure* (σ_{vo}) yang nilainya relatif kecil di lapis-lapis atas dan membesar di lapis-lapis bawah, maka kejadian likuifaksi cenderung dimulai dari lapis-lapis atas (di tempat σ_{vo} yang nilainya relatif kecil).

3. Cyclic Resistance Ratio (CRR)

Pada uji Standard Penetration Test (SPT) jumlah pukulan N (*number of blow counts*) pada *split-spoon* oleh pukulan/dijatuh *hammer* pada setiap 1-foot penurunan dijadikan suatu ukuran N-SPT terhadap kondisi tanah. N-SPT dapat dihubungkan dengan sudut gesek-dalam ϕ , *effective overburden pressure* σ'_{vo} , kepadatan relatif D_r (*relative density*). $(N_1)_{60}$ adalah *penetration resistance* uji SPT yang dinormalisasi pada *overburden pressure* 1-tsf (ton per sq feet, $\pm 1,07 \text{ kg/cm}^2$) atau 100 kPa (1,02 kg/cm^2) akibat *free-fall hammer* dengan efisiensi energi 60%. *Overburden* 1 tsf atau 100 kPa sering ditujukan untuk maksud tekanan udara 1 atmosfer. Sementara itu $(N_1)_{60cs}$ diartikan sebagai seperti sebelumnya tetapi diekivalensikan menjadi pasir bersih (*clean sand*) yang umumnya mempunyai batasan *Fines Content* $FC < 5 \%$. (Pawirodikromo 2012)

Metode Idriss-Boulanger adalah metode yang paling mendekati kejadian likuifaksi di lapangan. (Mase 2018). *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dapat dirumuskan (Boulanger 2014) :

$$CRR_{7,5} = \exp \left[\left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14,1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right)^2 \right) - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23,6} \right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25,4} \right)^4 - 2,8 \right] \quad (5)$$

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (6)$$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp \left[1,63 + \frac{9,7}{FC + 0,01} - \left(\frac{15,7}{FC + 0,01} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$$(N_1)_{60} = N_m C_N C_E C_B C_R C_S \quad (8)$$

Keterangan :

- N_m : nilai tahanan penetrasi standar
- C_N : faktor normalisasi N_m terhadap tegangan *overburden* pada umumnya
- C_E : koreksi rasio *energy hammer* (ER)
- C_B : koreksi untuk diameter lubang bor
- C_R : faktor koreksi dari panjang batang
- C_S : koreksi untuk sampel

Tabel 2 menjelaskan koreksi seperti keterangan di atas.

HIPOTESIS

Di lokasi studi yang rawan gempa bumi, memiliki jenis tanah pasir, dan memiliki muka air tanah yang tinggi, diperkirakan memiliki potensi terjadinya likuifaksi.

METODOLOGI

Untuk menganalisis potensi likuifaksi, diperlukan data tanah dan nilai percepatan gempa di lokasi studi. Data tanah yang digunakan untuk analisis diperoleh dari buku laporan pemborangan, berupa susunan jenis lapisan tanah, data N-SPT dan data hasil tes laboratorium.

Susunan Jenis Lapisan Tanah

Susunan jenis lapisan tanah diperoleh dari penyelidikan bor inti yang pelaksanaannya mengacu pada ASTM D22113 dan D145. Pemboran inti dilakukan guna mendapatkan informasi keadaan bawah permukaan akan sifat keteknikannya yang diperoleh dari deskripsi visual. Pada tiap jarak kedalaman tertentu dilakukan pengambilan contoh tanah sesuai

kondisi asli di tempatnya untuk diteliti lebih lanjut di laboratorium. Interpretasi lapisan tanah dilakukan visualisasi langsung di lapangan dari tanah yang dikeluarkan dari tabung sampel. Hasil

interpretasi lapisan tanah akan menghasilkan profil stratigrafi tanah berupa *soil description* seperti jenis tanah, kondisi plastisitas tanah, dan kondisi kerapatan relatif tanah.

Tabel 2. Nilai faktor koreksi untuk $(N_1)_{60}$

Factor	Equipment variable	Term	Correction
Overburden pressure	-	C_N	$C_N = 2,2/1,2 + (\sigma'_{vo}/Pa)$
Overburden pressure	-	C_N	$C_N \leq 1,7$
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	130 mm	C_B	1,03
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 : Badan Standardisasi Nasional (2008)

SPT

Prosedur pelaksanaan *SPT* dilaksanakan berdasarkan ASTM 1586-67. *SPT* dilakukan dengan memasukkan alat *split spoon* atau *split barrel sampler* pada lubang bor, dan dengan memakai sebuah beban penumbuk seberat 63,5 kg, dilakukan penetrasi sedalam 45 cm, 15 cm pertama tidak diperhitungkan. Jumlah pukulan ditentukan untuk memasukkan 30 cm berikutnya. Jumlah pukulan ini disebut nilai *N* dengan satuan *blow/feet*. Diperoleh nilai *N* yang menunjukkan kepadatan relatif dari tanah berbutir kasar dan konsistensi dari tanah berbutir halus. Semakin besar nilai *N* maka semakin padat dan keras tanah tersebut, dan penurunan dan tegangan air pori selama terjadinya getaran akan berkurang. Pengujian *SPT* dihentikan jika jumlah pukulan diperoleh lebih dari 50 pukulan (saat interval 15 cm) atau jika jumlah pukulan total lebih dari 100 pukulan (interval 45 cm).

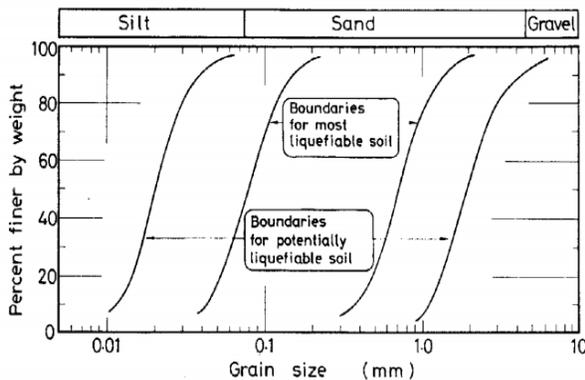
Uji Laboratorium

Hasil pengambilan contoh tanah tidak terganggu saat pemboran inti, harus segera dibawa ke laboratorium untuk dilakukan uji berat volume tanah dan analisa saringan. Berat volume tanah

diperoleh dari berat (gr) per volume *sample* (m^3), yang akan digunakan untuk menghitung tegangan *overburden* tanah (σ_v).

Analisa saringan dilakukan untuk menentukan pembagian ukuran butir suatu tanah dan kandungan butiran halus (FC).

Hasil data diameter ukuran butiran dan persentase berat lolos tersebut kemudian akan dianalisis gradasi ukuran butiran dengan grafik Koester & Tsuchida 1970 (lihat Gambar 5). Dari grafik tersebut dapat diplot dan diperoleh nilai diameter ukuran butir tanah yang memiliki persentase lolos sebesar 10%, 30%, 60% (d_{10} , d_{30} , d_{60}) yang kemudian akan digunakan untuk menghitung C_u dan C_c . Kandungan butiran halus (FC) akan digunakan untuk menghitung $(N_1)_{60cs}$



Sumber : Koester dan Tsuchida (1970)

Gambar 5. Kurva gradasi untuk tanah likuifaksi dan non likuifaksi

Percepatan Tanah Maksimum (a_{max})

Tahapan perhitungan percepatan maksimum di permukaan tanah menggunakan pedoman “Peta Hazard Gempa Indonesia; Sebagai Acuan Dasar Perencanaan dan Perancangan Infrastruktur Tahan Gempa” yang diterbitkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum tahun 2010. Untuk mendapatkan percepatan maksimum di permukaan tanah di suatu lokasi tinjauan, terlebih dahulu perlu dilakukan klasifikasi lokasi (*site*). Klasifikasi *site* harus ditentukan untuk lapisan setebal 30 m.

Tabel 3. Klasifikasi *Site* Didasarkan Atas Korelasi Penyelidikan Tanah Lapangan dan Laboratorium (SNI-2002, UBC-97, IBC-2009, ASCE 7-10,)

Klasifikasi Site	\bar{V}_s (m/dt)	\bar{N}	\bar{S}_u (kPa)
A. Batuan Keras	$\bar{V}_s \geq 1500$	-	-
B. Batuan	$750 < \bar{V}_s \leq 1500$	-	-
C. Tanah Sangat Padat dan Batuan Lunak	$350 < \bar{V}_s \leq 750$	$\bar{N} > 50$	$\bar{S}_u \geq 100$
D. Tanah Sedang	$175 < \bar{V}_s \leq 350$	$15 < \bar{N} \leq 50$	$50 < \bar{S}_u \leq 100$
E. Tanah Lunak	$\bar{V}_s < 175$	$\bar{N} < 15$	$\bar{S}_u < 50$

Atau setiap profil lapisan tanah dengan ketebalan lebih dari 3 m dengan karakteristik:
 Indeks plastisitas, $PI > 20$; Kadar air (w) $\geq 40\%$, dan Kuat geser tak terdrainase $\bar{S}_u < 50$

Sumber : Kementerian PU (2010)

Perhitungan \bar{N} rata-rata menggunakan persamaan berikut: (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat 2010)

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m t_i / N} \dots\dots\dots(9)$$

Keterangan:

- t_i : tebal lapisan tanah ke-i antara kedalaman 0 sampai 30 m
- N_i : nilai hasil uji penetrasi standar (SPT) lapisan tanah ke-i

$$\sum_{i=1}^m t_i : 30 \text{ m}$$

Nilai percepatan maksimum muka tanah dihitung dengan menggunakan rumus : (Indonesia 2010)

$$a_{maks} = F_{PGA} \times S_{PGA} \dots\dots\dots(10)$$

Keterangan:

- F_{PGA} : faktor amplifikasi
- S_{PGA} : percepatan gempa di batuan dasar

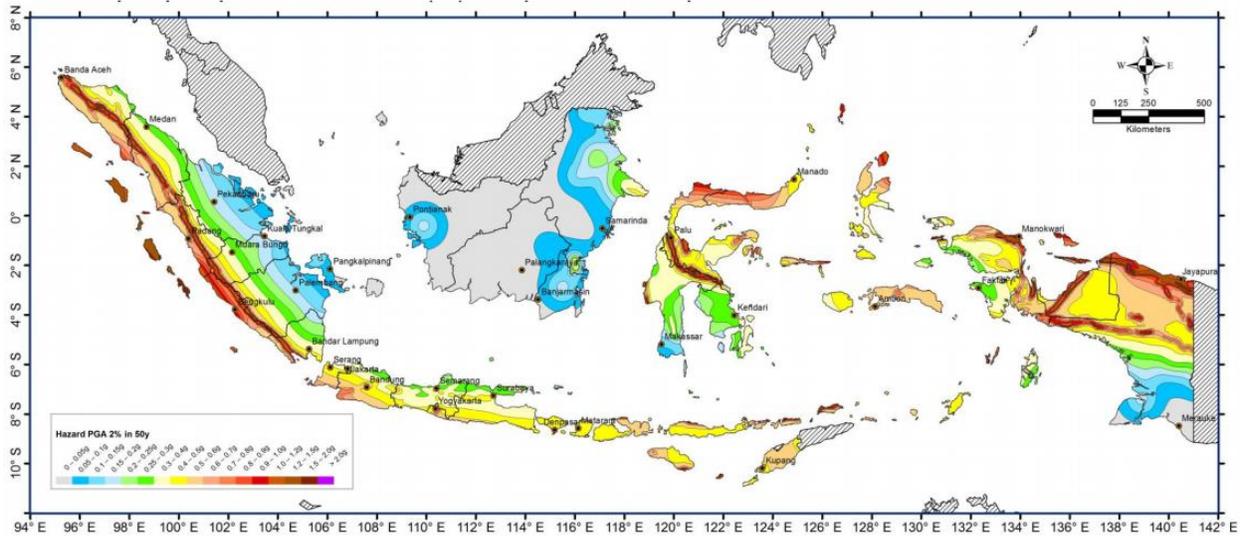
Faktor amplifikasi didefinisikan sebagai rasio besarnya percepatan puncak di permukaan dibagi percepatan puncak di batuan dasar. Faktor amplifikasi ini memiliki nilai yang berbeda dan tergantung dari jenis dan modulus geser tanah sesuai dengan level tegangan dan regangan yang terjadi. Faktor amplifikasi yang digunakan dalam perhitungan ini mengacu pada *American Society of Civil Engineers* (ASCE) 07-2010 dan *International Building Code* (IBC) 2009.

Besarnya percepatan puncak di permukaan tanah diperoleh dengan mengalikan faktor amplifikasi (F_{PGA}) dengan nilai PGA yang diperoleh dari Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (Gambar 6). Besarnya F_{PGA} tergantung dari klasifikasi site yang didasarkan pada Tabel 3 dan nilainya ditentukan sesuai Tabel 4.

Tabel 4. Faktor Amplifikasi untuk PGA (F_{PGA}) (ASCE 7-10)

Klasifikasi Site (Sesuai Tabel 3)	S_{PGA}				
	$PGA \leq 0.1$	$PGA = 0.2$	$PGA = 0.3$	$PGA = 0.4$	$PGA \geq 0.5$
Batuan Keras (SA)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan (SB)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Tanah Sangat Padat dan Batuan Lunak (SC)	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
Tanah Sedang (SD)	1,6	1,4	1,2	1,1	1
Tanah Lunak (SE)	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
Tanah Khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

Sumber: Kementerian PU (2010)



Sumber : Pusat Studi Gempa Nasional (2017)

Gambar 6. Peta Percepatan Puncak di Bantuan Dasar untuk Probabilitas Terlampaui 2% dalam 50 tahun

Analisis Likuifaksi

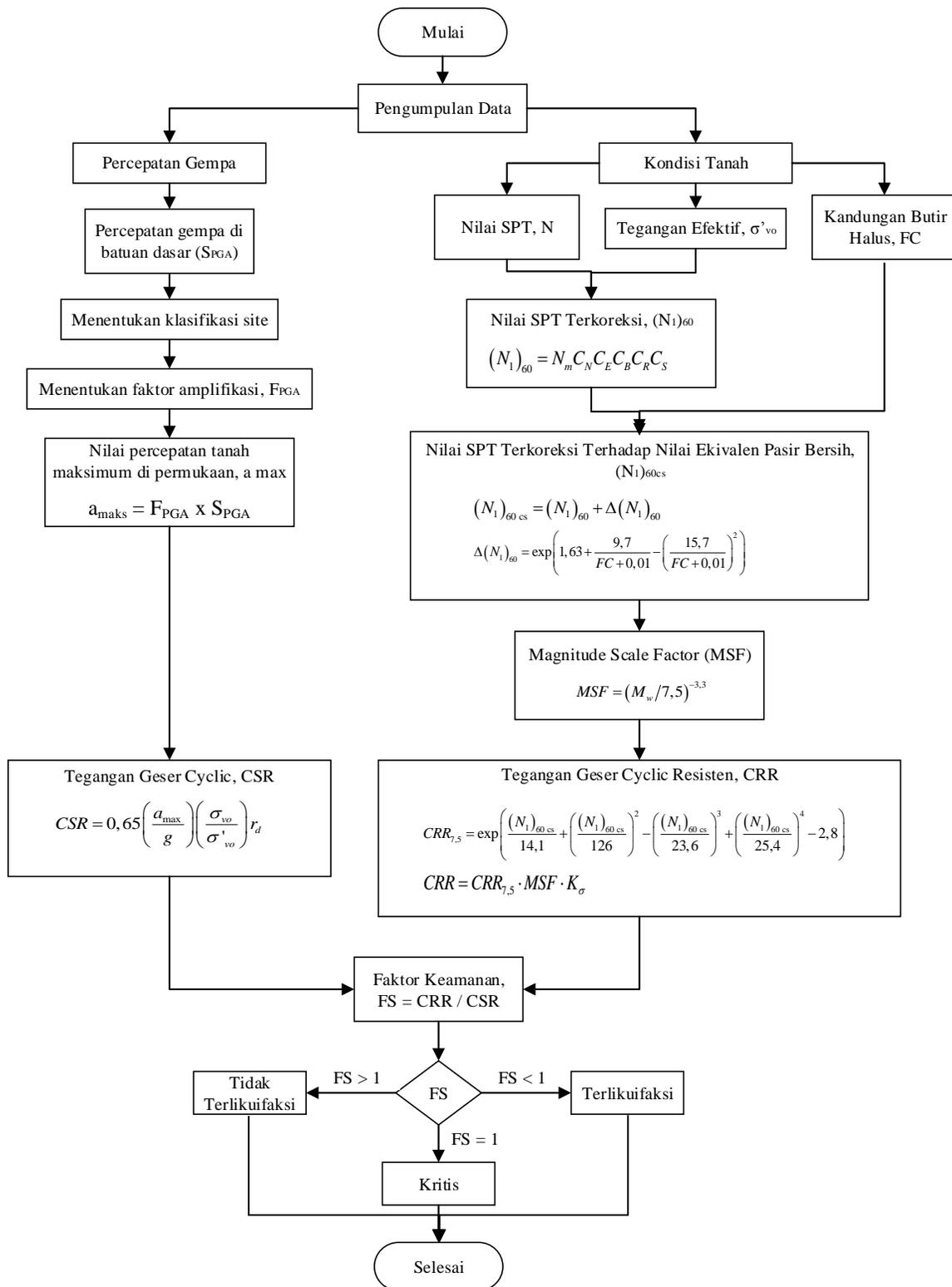
Dalam suatu analisis likuifaksi dibutuhkan suatu nilai faktor keamanan untuk mengetahui apakah likuifaksi terjadi atau tidak. Nilai faktor keamanan < 1 menyatakan bahwa tanah tersebut memiliki potensi likuifaksi, sedangkan faktor keamanan $= 1$ menyatakan kondisi kritis tanah menuju likuifaksi, dan faktor keamanan > 1 menyatakan bahwa potensi likuifaksi tidak terjadi.

Dalam analisis faktor keamanan dibutuhkan nilai-nilai yang harus dievaluasi terlebih dahulu. Adapun nilai tersebut ialah nilai *Cyclic Stress Ratio (CSR)* dan *Cyclic Resistance Ratio (CRR)*, dengan rumus sebagai berikut: (Pawirodikromo 2012)

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \dots\dots\dots(11)$$

Langkah-langkah perhitungan potensi likuifaksi adalah sebagai berikut:

1. Hitung nilai tegangan *overburden* (σ_v) dan tegangan efektif *overburden* (σ'_v) dari data berat volume tanah, kedalaman muka air tanah, sesuai dengan kedalaman tanah yang ditinjau.
2. Hitung faktor reduksi tegangan (r_d) yang sesuai dengan kedalaman lapisan tanah.
3. Hitung percepatan maksimum muka tanah (a_{maks}) mengacu pada Peta Gempa Hazard Indonesia 2010 (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat 2010) dan Buku Peta Gempa 2017 (Pustlitbang PUPR 2017)
4. Hitung tegangan geser siklik (CSR) pada setiap lapisan tanah



Gambar 7. Diagram alir perhitungan potensi likuifaksi

5. Hitung nilai N-SPT terkoreksi terhadap nilai ekuivalensi pasir bersih, sesuai dengan nilai butiran halus (FC). Hitung koefisien-koefisien kandungan butir halus sesuai FC pada tiap lapisan tanah.
6. Hitung tegangan geser siklik resisten (CRR) pada gempa referensi 7,5 SR pada setiap lapisan tanah
7. Tentukan magnitudo minimum yang dapat menyebabkan likuifaksi, dilakukan dengan trial error hingga nilai CRR < CSR.
8. Hitung faktor skala gempa (MSF)
9. Hitung tegangan geser siklik resisten (CRR) sesuai skala gempa yang telah dilakukan menurut langkah 9 pada setiap kedalaman tanah
10. Hitung faktor keamanan terhadap likuifaksi untuk setiap lapisan tanah
11. Gambar zona potensi likuifaksi pada lapisan tanah (Koester and Tsuchida 1989)

HASIL DAN ANALISIS

Baik buruknya gradasi tanah ditunjukkan oleh koefisien keseragaman (C_u) dan koefisien curvature (C_c). Nilai C_c juga menunjukkan dominasi jenis tanah yang ada pada tanah tersebut (Ikhsan 2011). C_u dan C_c dihitung sebagai berikut (Das and Sivakugan 2017)

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \dots\dots\dots (12)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \dots\dots\dots (13)$$

Keterangan:

D_{10} : diameter butiran yang memiliki persentase lolos sebesar 10%

D_{30} : diameter butiran yang memiliki persentase lolos sebesar 30%

D_{60} : diameter butiran yang memiliki persentase lolos sebesar 60%

Tabel 5. Nilai C_c dan C_u pada titik DH-01 dan DH-02

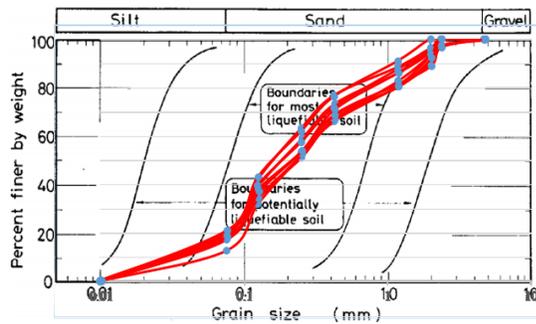
Lokasi	Kedalaman	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_u	C_c
DH-01	00,00 – 06,00 m	0,031	0,107	0,334	10,6	0,09
	06,00 – 08,50 m	0,029	0,096	0,224	7,77	0,13
	08,50 – 10,50 m	0,050	0,119	0,339	6,82	0,15
	10,50 – 18,00 m	0,027	0,097	0,259	9,52	0,11
DH-02	00,00 – 02,50 m	0,032	0,105	0,311	9,62	0,10
	02,50 – 04,00 m	0,027	0,094	0,234	8,56	0,12
	04,00 – 06,00 m	0,028	0,098	0,277	9,91	0,10
	06,00 – 10,00 m	0,026	0,098	0,301	11,57	0,09
	10,00 – 13,00 m	0,031	0,109	0,329	10,76	0,09
	13,00 – 35,00 m	0,029	0,103	0,311	10,56	0,09

Untuk tanah pasir bergradasi baik (*well graded*), memiliki nilai C_u lebih dari 6 dan C_c antara 1 – 3. Nilai rata-rata C_u di titik DH-01 dan DH-02 adalah $C_u > 6$ dan C_c kurang dari 1 – 3. Tanah pasir yang memiliki nilai $C_u > 6$ dan nilai C_c kurang dari 1 – 3, dapat dikategorikan sebagai *gap-graded soil* (Holtz and Kovacs 2011).

Apabila nilai C_u besar, maka terdapat perbedaan yang besar antara ukuran D_{60} dan D_{10} yang dapat terjadi dengan distribusi ukuran diantara dua persentase ini. Sedangkan nilai C_c cenderung memperlihatkan bentuk kurva di antara ukuran D_{60} dan D_{10} , nilai C_c yang kecil menghasilkan bentuk kurva yang cekung. Nilai C_c yang sangat kecil menunjukkan bahwa beberapa ukuran butiran

tidak terdapat pada contoh di antara D_{60} dan D_{10} , sehingga tanah dianggap mempunyai gradasi atau pembagian butiran yang kurang baik. Walaupun dari nilai koefisien keseragaman ini memenuhi sebagai *well-graded soil* (tanah yang terdistribusi dengan baik), tapi tidak memenuhi syarat dalam rentang nilai koefisien *curvature*. Oleh karena itu tanah ini digolongkan sebagai *poorly-graded soil* (tanah bergradasi buruk). Dari rentang gradasi butiran diatas dapat dilihat bahwa tanah di lokasi ini memiliki potensi untuk mengalami likuifaksi karena kurva merah masuk dalam *range "potentially liquifiable soil"* atau tanah pada kedalaman ini memiliki potensi untuk terjadi likuifaksi. Kurva yang dihasilkan pada rentang D_{60}

dan D_{10} juga berupa berbentuk cekung, yang artinya tanah ini mempunyai gradasi atau pembagian butiran yang kurang baik



Gambar 8. Rentang gradasi butiran titik DH-01 dan DH-02

Selanjutnya, menghitung potensi likuifaksi dengan metode Deterministik oleh Idriss-Boulanger tahun 2014. Untuk menghitung percepatan maksimum muka tanah (a_{maks}), kategori tanah pada lokasi studi harus diklasifikasikan berdasarkan N rata-rata menggunakan persamaan 9.

Klasifikasi *site* harus ditentukan untuk lapisan setebal 30 m. Sesuai dengan lokasi studi,

terdapat 2 titik *bore hole* yang akan dianalisis, yaitu titik DH-01 dan DH-02. Kategori tanah pada lokasi tersebut adalah termasuk kategori tanah sedang.

Kemudian menentukan faktor amplifikasi untuk PGA (F_{PGA}) dan nilai PGA di batuan dasar (S_{PGA}).

Berdasarkan Buku Peta Gempa 2017, diketahui nilai percepatan maksimum di batuan dasar sesuai lokasi studi adalah berkisar 0,4 g – 0,5 g. F_{PGA} untuk masing-masing S_{PGA} tersebut menurut kategori tanah sedang adalah 1,1 – 1. Kemudian a_{maks} dihitung menurut persamaan 10, diperoleh masing-masing 0,44 g (untuk $S_{PGA} = 0.4$ g dan $F_{PGA} = 1.1$); 0,5 g (untuk $S_{PGA} = 0.5$ g dan $F_{PGA} = 1$).

Nilai magnitudo minimum yang dapat menyebabkan terjadinya likuifaksi di wilayah studi, ditentukan secara coba-coba hingga nilai $CRR < CSR$. Tujuannya adalah untuk mengetahui nilai magnitudo minimum hingga likuifaksi bisa terdeteksi. Selengkapnya hasil perhitungan disajikan pada Tabel berikut.

Tabel 6. Rekapitulasi perhitungan berdasarkan data SPT ($a_{maks} = 0,44$ g)

Bore Hole	M_{min} (SR)	Depth range (m)	N SPT	Fines Content (%)	$(N_1)_{60cs}$	Cek $(N_1)_{60cs} \geq 30$	MSF	CSR	CRR 7.5	CRR	FS	Cek
DH-01	5,5	0 – 2	41	17,6	81,205	YES	2,783	0,500	2	5,566	11,121	TL
		2 – 4	29	17,6	52,929	YES	2,783	0,546	2	5,566	10,199	TL
		4 – 6	17	17,6	29,980	NO	2,783	0,557	0,484	1,346	2,416	TL
		6 – 8	14	19	24,437	NO	2,783	0,584	0,277	0,772	1,322	TL
		8 – 10	19	12,6	27,370	NO	2,783	0,563	0,359	1,000	1,775	TL
		10 – 12	11	20,2	17,549	NO	2,783	0,515	0,179	0,499	0,969	L
		12 – 14	16	20,2	22,169	NO	2,783	0,485	0,236	0,656	1,352	TL
		14 – 16	24	20,2	29,293	NO	2,783	0,455	0,444	1,145	2,519	TL
DH-02	6,1	0 – 2	44	17,2	85,614	YES	1,977	0,469	2	3,955	8,439	TL
		2 – 4	14	20	28,308	NO	1,977	0,548	0,397	0,784	1,430	TL
		4 – 6	13	19,6	24,368	NO	1,977	0,556	0,276	0,545	0,980	L
		6 – 8	18	21,1	29,659	NO	1,977	0,551	0,464	0,918	1,668	TL
		8 – 10	18	21,1	27,686	NO	1,977	0,540	0,371	0,734	1,360	TL
		10 – 12	30	18	38,063	YES	1,977	0,488	2	3,955	8,111	TL
		12 – 14	17	18,7	20,426	NO	1,977	0,422	0,211	0,418	0,990	L
		14 – 16	31	18,7	31,609	YES	1,977	0,395	2	3,954	10,01	TL

Keterangan : TL (Tidak berpotensi Likuifaksi), L (berpotensi Likuifaksi)

Tabel 7. Rekapitulasi perhitungan berdasarkan data SPT ($a_{max} = 0,5 \text{ g}$)

Bore Hole	M min (SR)	Depth range (m)	N SPT	Fines Content (%)	(N ₁) _{60cs}	Cek (N ₁) _{60cs} ≥ 30	MSF	CSR	CRR 7.5	CRR	FS	Cek
DH-01	5,3	0 – 2	41	17,6	81,205	YES	3,145	0,569	2	6,290	11,059	TL
		2 – 4	29	17,6	52,929	YES	3,145	0,620	2	6,290	10,142	TL
		4 – 6	17	17,6	29,980	NO	3,145	0,633	0,484	1,521	2,403	TL
		6 – 8	14	19	24,437	NO	3,145	0,663	0,277	0,872	1,315	TL
		8 – 10	19	12,6	27,370	NO	3,145	0,640	0,359	1,130	1,766	TL
		10 – 12	11	20,2	17,549	NO	3,145	0,585	0,179	0,564	0,964	L
		12 – 14	16	20,2	22,169	NO	3,145	0,551	0,236	0,741	1,345	TL
		14 – 16	24	20,2	29,293	NO	3,145	0,516	0,444	1,294	2,505	TL
DH-02	5,9	0 – 2	44	17,2	85,614	YES	2,207	0,533	2,000	4,415	8,290	TL
		2 – 4	14	20	28,308	NO	2,207	0,623	0,397	0,875	1,405	TL
		4 – 6	13	19,6	24,368	NO	2,207	0,632	0,276	0,609	0,963	L
		6 – 8	18	21,1	29,659	NO	2,207	0,626	0,464	1,025	1,638	TL
		8 – 10	18	21,1	27,686	NO	2,207	0,613	0,371	0,819	1,336	TL
		10 – 12	30	18	38,063	YES	2,207	0,554	2,000	4,415	7,968	TL
		12 – 14	17	18,7	20,426	NO	2,207	0,479	0,211	0,466	0,973	L
		14 – 16	31	18,7	31,609	YES	2,207	0,449	2	4,414	9,831	TL

Keterangan : TL (Tidak berpotensi Likuifaksi), L (berpotensi Likuifaksi)

PEMBAHASAN

Di lokasi studi ini memiliki jenis tanah dominasi *non-cohesive* pasir jenuh air, memiliki gradasi atau pembagian butiran yang buruk (ditunjukkan oleh grafik Tsuchida), memiliki nilai kepadatan relative (D_r) berkisar 40-50%. Menurut Das (2010), nilai tersebut memiliki kepadatan relatif yang *loose* (pasir lepas) artinya tanah mengandung sedikit butiran halus dan rentan terhadap beban statis maupun dinamis. Tanah di lokasi studi juga rentan terhadap *cyclic load* (karena termasuk daerah rawan gempa) dan memiliki nilai a_{maks} berkisar 0,44 g – 0,5 g. Pada saat kecepatan tanah maksimum (a_{maks}) = 0,44 g

1. Pada titik DH-01, terjadi likuifaksi di kedalaman 10-12 m saat nilai magnitudo 5,5 SR
2. Pada titik DH-02, terjadi likuifaksi di kedalaman 4-6 m dan 12-14 m saat nilai magnitudo 6,1 SR

Pada saat kecepatan tanah maksimum (a_{maks}) = 0,5 g

1. Pada titik DH-01, terjadi likuifaksi di kedalaman 10-12 m saat nilai magnitudo 5,3 SR

2. Pada titik DH-02, terjadi likuifaksi di kedalaman 4-6 m dan 12-14 m saat nilai magnitudo 5,9 SR

Berdasarkan hasil perhitungan Tabel 6 dan Tabel 7, terlihat bahwa pada kedalaman tertentu tanah memiliki faktor keamanan kurang dari satu yang mengindikasikan bahwa pada kedalaman tersebut tanah tidak memiliki *cyclic resistance ratio* (CRR) yang cukup besar dibandingkan dengan *cyclic stress ratio* (CSR) yang diakibatkan oleh gempa bumi. Selain itu data dari gradasi butiran tanah pada kedalaman tersebut juga menguatkan analisis dari kecilnya tahanan tanah tersebut karena memiliki gradasi atau pembagian butiran yang kurang baik (*poorly graded soil*), dan termasuk pada zona “*potentially liquifiable soil*” berdasarkan metode Koester & Tsuchida (1970).

Selain faktor gradasi butiran yang kurang baik, faktor besarnya nilai N-SPT pada titik tersebut juga mempengaruhi suatu tanah mengalami likuifaksi atau tidak. Nilai (N₁)_{60cs} menunjukkan kepadatan tanah pasir bersih yang terdiri dari tanah pasir berbutir kasar dan butiran halus. Semakin meningkat nilai (N₁)_{60cs} maka

semakin padat tanah dan semakin banyak kandungan butiran halus sehingga meningkatkan kekuatan tanah dalam menahan beban seismik.

Menurut Boulanger 2010, batas minimum nilai $(N_1)_{60cs} = 30$ untuk tanah pasir yang dianggap cukup padat dalam menahan likuifaksi.

Berdasarkan Tabel 6 dan Tabel 7, terdapat beberapa lapisan tanah yang padat atau memiliki nilai $(N_1)_{60cs} \geq 30$, yaitu pada :

Titik DH-01, kedalaman : 0–4 m

Titik DH-02, kedalaman : 0–2 m, 10–12 m dan 14–16 m

Besarnya nilai $(N_1)_{60cs}$ disebabkan karena banyaknya jumlah pukulan saat dilakukan pengujian SPT di lapangan (N-SPT).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Hasil analisis potensi likuifaksi menunjukkan bahwa di titik pengujian terindikasi likuifaksi di kedalaman tertentu, yang ditunjukkan oleh nilai faktor keamanan kurang dari satu (CRR < CSR). Potensi likuifaksi terdeteksi di kedalaman 10-12 meter di titik DH-01 dan 4-6 meter dan 12-14 meter di titik DH-02. Nilai gradasi butiran tanah pada kedalaman yang terdeteksi likuifaksi juga menguatkan analisis dari kecilnya tahanan tanah tersebut karena memiliki gradasi yang kurang baik, dan termasuk pada zona “*potentially liquifiable soil*”. Semakin besar nilai $(N_1)_{60cs}$ maka tanah semakin padat dan potensi likuifaksi semakin kecil.

Saran

Lokasi studi titik DH-01 dan DH-02 yang berpotensi likuifaksi, disarankan untuk melakukan rekayasa pencegahan, yaitu dengan pemancangan hingga tanah keras yang melewati lapisan berpotensi likuifaksi.

Analisis likuifaksi sebaiknya dihitung juga berdasarkan data sondir.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang mendukung penelitian ini sehingga terwujudnya karya tulis ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Civil Engineers (ASCE). 2010. “Minimum design loads for buildings and other structures”. Virginia: ASCE.
- Badan Standardisasi Nasional. 2008. *Standar Nasional Indonesia : Cara Uji Penetrasi Lapangan Dengan SPT*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Boulanger, Idriss. 2010. “SPT-Based Liquefaction Triggering Procedures.” Davis, California.
- . 2014. “Cpt and Spt Based Liquefaction Investigations, Adapazari, Turkey.” *Center for Geotechnical Modelling (Report No. UCD/CGM-14/01)*.
- Britannica, Encyclopædia. 2012. “Soil Liquefaction.” Encyclopædia Britannica. 2012. <https://www.britannica.com/science/soil-liquefaction/images-videos#/media/1/1775711/167786>.
- Das, Braja M. 2010. *Principles of Geotechnical Engineering, 7th Edition*. Edited by Hilda Gowans and Nancy Saundercook. 7th ed. USA: Cengage Learning.
- Das, Braja M., and Nagaratnam Sivakugan. 2017. *Fundamentals of Geotechnical Engineering: Fifth Edition*. Edited by Harlan James. United States of America: Cengage Learning.
- Holtz, Robert D., and William D. Kovacs. 2011. *An Introduction to Geotechnical Engineer*. Edited by Karen Skrable. New Jersey: Prentice Hall.
- International Code Council (ICC). 2009. *International Building Code (IBC)*.
- Ikhsan, Rifa. 2011. “Analisis Potensi Likuifaksi Dari Data CPT Dan SPT Dengan Studi Kasus PLTU Ende Nusa Tenggara Timur.” Indonesia. [http://lib.ui.ac.id/file?file=digital/20283425-S1046-Rifa Ikhsan.pdf](http://lib.ui.ac.id/file?file=digital/20283425-S1046-Rifa%20Ikhsan.pdf).
- Indonesia, Kementerian Pekerjaan Umum (PU). 2010. *Peta Hazard Gempa Indonesia 2010*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum.
- Koester, Joseph P, and Takashi Tsuchida. 1989. “Earthquake-Induced Liquefaction Of Fine-Grained Soils-Considerations From Japanese Research.” Washington DC.
- Mase, Lindung Zalbuin. 2018. “Studi Keandalan Metode Analisis Likuifaksi Menggunakan SPT Akibat Gempa 8,6 Mw, 12 September 2007 Di Area Pesisir Kota Bengkulu.” *Journal of Civil Engineering* 25 (1): 53–60. <https://doi.org/10.5614/jts.2018.25.1.7>.
- Pawirodikromo, Widodo. 2012. *Seismologi Teknik & Rekayasa Kegempaan*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.

Pustlitbang PUPR. 2017. *Buku Peta Gempa 2017*.
Edited by Masyhur Irsyam, Sri Widiyantoro,
Danny hilman Natawidjaja, Irwan Meilano,
Ariska Rudyanto, Sri Hidayati, Wahyu Triyoso,
et al. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan
Perumahan Rakyat.