

ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI (STUDI KASUS: PLTU AREA GORONTALO)

Caver Allen Vallery Tandaju

Fabian J. Manoppo, Jack H. Ticoth

Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sam Ratulangi Manado

Email: cavertandaju@gmail.com

Gempa bumi adalah salah satu bencana sangat merusak dengan skala yang besar juga mengakibatkan kerugian yang tidak sedikit, gempa bumi juga sulit untuk diprediksi kapan dan dimana gempa akan terjadi. Sebagai akibat dari dampak terjadinya gempa bumi, muncul masalah lain akibat dari gempa bumi yaitu salah satunya terjadinya fenomena likuifaksi.

Likuifaksi yaitu perubahan kondisi tanah yang awalnya solid menjadi cair sebagai akibat dari hilangnya tegangan geser tanah akibat kenaikan tegangan air pori yang disebabkan oleh beban cyclic atau beban berulang dalam hal ini beban gempa. Likuifaksi biasanya terjadi pada kondisi tanah yang berbutir kasar (granular Soil) tanah bertipe seperti ini mencakup kerikil, pasir, atau lanau dengan sedikit atau tidak ada kandungan lempung. Tanah berjenis seperti ini tidak memiliki nilai kohesi yang berarti, melihat potensi likuifaksi yang sangat merusak dampaknya terhadap suatu bangunan konstruksi. Dalam hal ini PLTU Area Gorontalo menjadi lokasi penelitian potensi likuifaksi dengan menggunakan data dari Standart Penetration Test (SPT).

Berdasarkan data dari Standart Penetration Test (SPT), kemudian dihitung parameter – parameter nilai yang akan dihitung dalam mengevaluasi potensi likuifaksi. Parameter – parameter tersebut yaitu nilai Cyclic Stress Ratio (CSR) yaitu nilai ratio dari tegangan tanah akibat beban gempa dan nilai Cyclic Resistance Ratio) yaitu nilai ratio ketahanan tanah terhadap beban siklik atau beban gempa. Pada lokasi penelitian ada dua titik yang ditinjau yaitu titik BH-1 dan titik BH-3, dari hasil perhitungan potensi kedua titik, pada titik BH-1 terjadi potensi likuifaksi pada kedalaman 1.5 m dan kedalaman 3 m untuk semua variasi gempa yang dipakai. Pada titik BH-3 potensi likuifaksi terjadi pada kedalaman 1.5 m untuk gempa bermagnitude 7.0 dan 7.4 dan untuk gempa 7.8 dan 8.0 magnitude potensi likuifaksinya terjadi pada kedalaman 1.5 m sampai 3 m. Faktor meningkatnya magnitude gempa juga mempengaruhi nilai CRR dan FS.

Kata Kunci : *Gempa Bumi, Likuifaksi, Cyclic Stress Ratio (CSR), Cyclic Resistance Ratio (CRR), Standard Penetration Test (SPT).*

PENDAHULUAN

Latar belakang

Gempa bumi adalah salah satu bencana sangat merusak dengan skala yang besar juga mengakibatkan kerugian yang tidak sedikit, gempa bumi juga sulit untuk diprediksi kapan dan dimana gempa akan terjadi. Indonesia menjadi salah satu negara yang rawan terjadi gempa baik itu gempa tektonik ataupun gempa vulkanik, Indonesia terletak pada jalur yang cincin api atau *ring of fire* yaitu barisan gunung api yang melintasi dunia. Sehingga banyak gempa yang diakibatkan oleh gunung berapi, Indonesia juga terletak di pertemuan tiga lempeng tektonik besar yaitu lempeng indo-australia, indo-cina,

dan lempeng pasifik. Sehingga mengakibatkan tingginya tingkat kegempaan yang ada di Indonesia, menurut USGS (*United States Geological Survey*) dari 20 gempa bumi terbesar di dunia sejak tahun 1900, lima di antaranya pernah terjadi di Indonesia. Provinsi Gorontalo berdasarkan peta gempa hazard Indonesia 2010 dekat dengan *Megathrust North Sulawesi Subduction* dalam hal ini mengakibatkan provinsi Gorontalo menjadi rawan terkena gempa. Dampak serius dari gempa bumi bisa sangat merusak segala macam jenis konstruksi yang ada, pembangkit listrik sebagai konstruksi bangunan yang sangat vital fungsinya untuk kehidupan sangat penting untuk di rencanakan dengan tepat, dalam

hal ini salah satunya mengacu pada potensi-potensi yang bisa merusak ataupun menghambat pembangunan PLTU Gorontalo seperti potensi likuifaksi yang bisa terjadi.

Akibat pengaruh adanya gempa fenomena seperti likuifaksi bisa terjadi, sejarah likuifaksi yang pernah terjadi di dunia tercatat diantaranya terjadi di Jepang dan Alaska yang mengakibatkan bergesernya bangunan apartemen dekat tepian sungai, pada tahun 2011 juga terjadi likuifaksi di daerah Tohoku Jepang sebagai akibat dari gempa bermagnitude 8.9, di negara Selandia Baru juga terjadi likuifaksi tepatnya di daerah Christchurch 2011 yang merusak sejumlah bangunan, di daerah Petobo Kota Palu Provinsi Sulawesi Tengah terjadi pula likuifaksi dalam skala besar yang mengakibatkan sebuah desa mengalami kerusakan parah.

Likuifaksi adalah suatu kejadian dimana tanah terjadi kehilangan kekuatan geser karena meningkatnya tegangan air pori sebagai akibat terjadinya beban siklik (beban gempa) yang sangat cepat dan dalam waktu sesaat (Idriss dan Boulanger, 2008). Karena kehilangan kekakuan serta tegangan gesernya mengakibatkan sifat tanah yang awalnya padat menjadi cair. Likuifaksi biasanya terjadi pada kondisi tanah yang berbutir kasar (granular Soil) tanah bertipe seperti ini mencakup kerikil, pasir, atau lanau dengan sedikit atau tidak ada kandungan lempung. Tanah berjenis seperti ini tidak memiliki nilai kohesi yang berarti, beberapa pendapat yang menyatakan likuifaksi terjadi hanya pada tanah granular didasarkan hasil observasi pada sebagian besar sejarah likuifaksi di dunia (lihat Youd & Perkins, 1997). Meskipun ada juga temuan yang mengindikasikan terjadi pada tanah berbutir halus (lihat Seed & Dkk, 2008).

Karena melihat potensi likuifaksi yang sangat merusak, sangat penting untuk mempertimbangkan potensi likuifaksi dalam membangun suatu konstruksi bangunan. Pada penelitian ini, studi kasus untuk likuifaksi belum dilakukan di daerah yang akan ditinjau. Melihat dampak dari bencana likuifaksi yang sangat merusak dan bahkan bisa menimbulkan korban jiwa, karena itu penelitian ini dilakukan sehingga bisa mencegah atau

meminimalisir jika terjadi bencana atau fenomena likuifaksi di daerah yang akan dilakukan penelitian.

Rumusan Masalah

Berdasarkan masalah masalah yang telah dijabarkan di latar belakang, masalah yang akan dibahas yaitu :

- a) Mengidentifikasi potensi likuifaksi di proyek pembangunan PLTU Gorontalo.
- b) Menganalisis Pengaruh beban gempa terhadap potensi likuifaksi.

Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah yang ada di penelitian ini yaitu :

1. Lokasi penelitian hanya dilakukan di PLTU Area Gorontalo.
2. Tidak menghitung estimasi biaya
3. Metode yang dipakai untuk menganalisa potensi likuifaksi menggunakan *Standart Penetration Test* (SPT).
4. Tidak menganalisis penurunan (*settlement*).
5. Data tanah yang didapat yaitu data tanah sekunder.
6. Data percepatan gempa (*amax*) diambil dari situs website puskim.

Tujuan Penelitian

1. Untuk mengidentifikasi potensi likuifaksi di proyek pembangunan PLTU Gorontalo.
2. Analisis perhitungan *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) menggunakan data *Standart Penetration Test* (SPT).
3. Untuk Menganalisis pengaruh *Peak Ground Acceleration* (PGA) terhadap potensi likuifaksi.

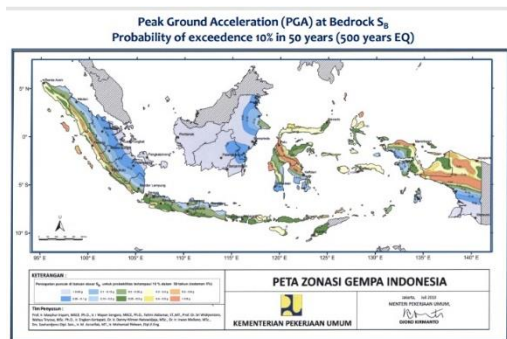
Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini yaitu diharapkan membantu pembangunan PLTU Gorontalo dan bisa menjadi masukan dalam perencanaan pembangunan PLTU Gorontalo.

LANDASAN TEORI

Gempa

Gempa bumi adalah suatu sentakan asli dari dalam bumi, dari dalam bumi kemudian merambat ke permukaan bumi. gempa bumi berkaitan dengan serangkaian gerak gelombang yg merambat dan menembus batuan penyusun bumi. Secara geografis pulau Sulawesi terletak di 2°08'LU 120°17'BT, Pulau Sulawesi terletak pada zona pertemuan di antara tiga pergerakan lempeng besar yang bertemu secara konvergen. Konvergensi ini menimbulkan pengembangan semua jenis struktur di semua skala, termasuk subduksi dan zona tumbukan, sesar dan thrust.



Gambar 1. Peta Zona Gempa Indonesia 2017

Sumber : <http://puskim.pu.go.id>

Tanah

Pada Umumnya, kebanyakan dari jenis tanah di bumi berpotensi untuk terjadinya likuifaksi. Ishihara (1985) mengatakan bahwa "Tanah yang telah diketahui akan beresiko untuk terjadinya likuifaksi selama gempa bumi dapat ditemui di dalam lapisan tanah yang terdiri butiran pasir kecil hingga butiran pasir medium serta pasir yang berisi debu yang berplastisitas rendah. Namun adakalanya, terjadi juga kasus-kasus likuifaksi pada tanah yang berkerikil". Dengan demikian, jenis tanah yang rentan kepada likuifaksi adalah tanah yang bersifat tidak berplastisitas (*non plasticity*) atau tanah yang berplastisitas rendah (*low plasticity*). Jika diurutkan dari yang paling kecil sampai yang paling besar daya tahannya terhadap likuifaksinya maka akan di peroleh data sebagai berikut:

1. Pasir bersih.
2. Pasir berlanau tidak berplastisitas.

3. Lanau tidak berplastisitas.
4. Kerikil-kerikil.

Tegangan Dalam Tanah

Tegangan vertikal total adalah tegangan yang tedapat pada lapisan tanah, yang diakibatkan oleh beban dari tanah yang ada di atasnya dengan tidak memperhitungkan tegangan air pori yang diakibatkan oleh air (u). Tegangan vertikal total dihitung dengan rumus:

$$\sigma_v = \Sigma (\gamma \cdot z) \tag{1}$$

dimana:

- σ_v = Tegangan vertikal total (KN/m²)
- γ = Berat isi lapisan tanah (KN/m³)
- z = Kedalaman yang ditinjau (m)

Tegangan vertikal efektif adalah tegangan pada lapisan tanah yang disebabkan oleh beban dari tanah yang ada di atasnya dengan memperhitungkan tegangan air pori (u). Tegangan air pori mengakibatkan tekanan yang berasal dari beban tanah menjadi berkurang tegangan. Tegangan vertikal efektif dihitung dengan rumus:

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

dimana:

- σ'_v = Tegangan vertikal efektif (KN/m²)
- σ_v = Tegangan vertikal total (KN/m²)
- u = Tegangan air pori (KN/m²) = $\gamma_w \cdot z$

Teori Likuifaksi

Menurut Seed et al (1975), 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. . Likuifaksi juga adalah fenomena hilangnya kekuatan lapisan tanah akibat getaran menurut Tijow dkk (2018).

Faktor-faktor yang Mempengaruhi Terjadinya Likuifaksi

Secara umum faktor-faktor yang mempengaruhi terjadi potensi likuifaksi yaitu:

1. Intensitas dan Durasi Dari Gempa
2. Rapat Relatif Tanah (Dr)

3. Gradasi Ukuran Partikel
4. Letak Geologis Tanah
5. Kondisi Drainase
6. Tegangan Selimut (*Confining Pressures*)
7. Posisi Letak Muka Air Tanah
8. Sejarah Tanah
9. Beban Bangunan

Dampak Terjadinya Likuifaksi

Likuifaksi kebanyakan terjadi pada tanah yang tersaturasi, maka efeknya seringkali hanya diamati pada Kawasan/area yang dekat dengan badan air seperti sungai, danau, dan laut. Beberapa efek yang diakibatkan oleh likuifaksi dapat berupa longsor besar tau terjadinya retakan-retakan pada tanah yang parallel dengan badan air seperti pada kasus yang terjadi pada sungai motagua, Guatemala 1976. Likuifaksi juga dapat merusak konstruksi suatu jembatan yang melewati badan air. Pergerakan tanah pada peristiwa likuifaksi dapat menyebabkan terdorongnya pondasi suatu jembatan keluar sehingga jembatan kehilangan supportnya atau dengan kata lain menyebabkan terjadinya “*Buckling*” pada pondasi jembatan.

Metode untuk mengevaluasi potensi likuifaksi

Dalam menganalisis potensi likuifaksi dapat dilakukan dengan dua cara yaitu tes uji laboratorium dan hasil tes uji lapangan yang kemudian dihitung faktor keamanannya (Emora dkk 2019). Dalam penelitian ini penulis bertujuan untuk mendapatkan hasil nilai potensi likuifaksi dari hasil uji lapangan yaitu data SPT. Adapun untuk menganalisis potensi likuifaksi dibutuhkan nilai rasio tegangan siklik (CSR) dan nilai rasio tahanan siklik (CRR) yang bisa didapatkan dari nilai CPT (sondir), SPT (bor dalam), V_s (shearwave velocity), dan beberapa uji tanah lainnya termasuk Becker Penetration Test (BPT). Dalam penelitian ini dilakukan perhitungan dari data SPT.

Metode untuk mengevaluasi potensi likuifaksi adalah dengan cara mendapatkan nilai faktor keamanan dari hasil perbandingan nilai CRR (Cyclic Resistance Ratio) yaitu nilai yang mencerminkan kekuatan tanah terhadap

beban siklis yang biasanya diakibatkan oleh beban gempa bumi dengan CSR (Cyclic Stress Ratio) yaitu nilai tegangan yang disebabkan oleh gempa bumi. Faktor keamanan yang digunakan tidak boleh kurang dari satu, karena jika kurang dari satu maka tanah akan mengalami likuifaksi. Berikut sedikit diilustrasikan oleh sebuah persamaan:

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (3)$$

jika $FS = \frac{CRR}{CSR} < 1$ (terjadi likuifaksi)

jika $FS = \frac{CRR}{CSR} = 1$ (kondisi kritis)

jika $FS = \frac{CRR}{CSR} > 1$ (tidak terjadi likuifaksi)

Metode Evaluasi Cyclic Stress Ratio (CSR)

Pada tahun 1971 Seed dan Idris memformulirkan suatu persamaan untuk rasio tegangan siklik, yaitu :

$$CSR = 0.65 (a_{max} / g) (\sigma_v / \sigma'_v) r_d \quad (4)$$

Dimana:

a_{max} = Percepatan gempa maksimum akibat gempa

g = Percepatan gravitasi

σ_v = Tegangan total tanah

σ'_v = Tegangan efektif tanah

r_d = Koefisien tegangan reduksi

untuk nilai r_d Idriss dan Boulanger (2010) menyimpulkan bahwa nilai koefisien tegangan reduksi (r_d) harus menunjukkan fungsi dari kedalaman juga *earthquake magnitude* (M_w). Berikut persamaan dari analisis tersebut:

$$r_d = \exp(\alpha + \beta \times M_w) \quad (5)$$

$$\alpha = -1,012 - 1,126 \sin(5,133 + \frac{z}{11,73}) \quad (6)$$

$$\beta = 0,106 + 0,118 \sin(5,142 + \frac{z}{11,28}) \quad (7)$$

dengan z adalah kedalaman dalam satuan meter, sedangkan M_w adalah *moment magnitude*.

Metode Evaluasi Cyclic Resistance Ratio (CRR)

Dalam menghitung dan mengevaluasi nilai CRR dari *Standart Penetration Test* (SPT) dilakukan dengan pendekatan perhitungan yang diformulirkan Youd and Idris (2001).

1. Menghitung nilai $(N1)_{60}$

$$(N1)_{60} = N_m C_N C_E C_B C_R C_S \quad (8)$$

Dimana :

N_m = N-SPT yang diperoleh dari tes lapangan

C_N = Faktor normalisasi N_m terhadap tegangan *overburden* pada umumnya

C_E = Koreksi rasio energi *hammer*

C_B = Koreksi untuk diameter lubang bor

C_R = Faktor koreksi dari panjang batang

C_S = Koreksi untuk sampel

Setelah didapat hasil nilai N-SPT yang telah dikoreksi 60% efisiensi energi (N60) dihitung pula faktor koreksi tekanan *overburden* karena adanya peningkatan nilai N-SPT dengan meningkatnya tekanan *overburden*, faktor koreksi tegangan *overburden* harus digunakan (Seed and Idriss, 1982). Faktor koreksi dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_N = 2,2 / (1,2 + \frac{\sigma'_{vo}}{P_a}) \quad (9)$$

Dimana :

σ'_{vo} = Tekanan tanah efektif

P_a = tekanan atmosfer 100 kpa (1atm)

Dimana nilai c_n tidak melebihi 1.7. Faktor koreksi lain nilai *Standard Penetration Test* (SPT) dapat ditentukan dengan tabel 1 berikut:

Tabel 1 Faktor Koreksi Terhadap SPT (Skempton)

Factor	Equipment variable	Term	Correction
Overburden pressure	-	C_N	$(P_a/\sigma'_{vo})^{0.5}$
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	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

2. Menghitung Nilai $(N1)_{60cs}$

Persamaan berikut diformulirkan oleh IM Idriss dan R.B. Seed untuk faktor koreksi $(N1)_{60}$ penyetaraan nilai *clean sand*, $(N1)_{60cs}$.

$$(N1)_{60cs} = \alpha + \beta (N1)_{60} \quad (10)$$

Dimana α dan β adalah koefisien yang didapatkan dari persamaan sebagai berikut:

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

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

$\alpha = 5,0$ untuk $FC \geq 35\%$

$\beta = 1,0$ untuk $FC \leq 5\%$

$\beta = [0,99 + (FC^{1.5}/1,000)]$ untuk $5\% < FC < 35\%$

$\beta = 1,2$ untuk $FC \geq 35\%$

persamaan ini bisa digunakan untuk menghitung ketahanan likuifaksi pada umumnya.

Menghitung Nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR)

Idriss & Boulanger (2010) memformulirkan beberapa parameter nilai yang sudah dirubah rumusnya, sehingga untuk persamaan menghitung nilai CRR yang ditambahkan dengan nilai momen magnitude sebesar 7.5 diformulirkan sebagai berikut:

$$CRR_{7,5} = \exp\left\{\frac{(N1)_{60cs}}{14.1}\right\} + \left[\frac{(N1)_{60cs}}{126}\right]^2 - \left[\frac{(N1)_{60cs}}{23.6}\right]^3 + \left[\frac{(N1)_{60cs}}{25.4}\right]^4 - 2.8 \quad (11)$$

Pada skala gempa yang berbeda dengan gempa 7,5 skala Richter diperlukan faktor koreksi yang disebut *Magnitude Scale Factor* (MSF) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

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

Dimana :

$CRR_{7,5}$ = CRR pada skala 7,5 skala Richter

K_σ = Faktor koreksi *overburden*

MSF = Faktor skala gempa

Dalam penelitian ini untuk menganalisis nilai MSF atau *Magnitude Scalling Factor* digunakan rumus persamaan yang dikemukakan oleh idriss (1999) yaitu sebagai berikut:

$$MSF = -0.058 + 6.9 \exp(-0.25M_w) \leq 1.8 \quad (13)$$

Faktor koreksi *overburden* dihitung dengan memakai persamaan:

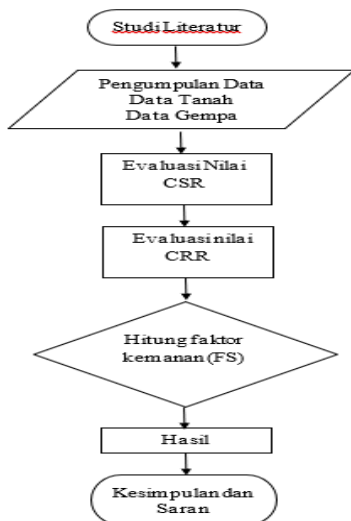
$$K_\sigma = \left(\frac{\sigma'_{vo}}{P_a}\right)^f \quad (14)$$

Dimana f adalah faktor kerapatan relaiif tanah, dihitung dengan memakai persamaan:

$$f = 0,831 - \frac{(N1)_{60cs}}{160} \quad (15)$$

METODOLOGI PENELITIAN

Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

Tinjauan Umum

Dalam melakukan penelitian analisa potensi likuifaksi terdapat dua acara yang dapat dilakukan pertama dengan penelitian yang dilakukan di laboratorium dan yang kedua dilakukan dengan perhitungan empiris berdasarkan data yang di dapat di lapangan seperti data SPT dan CPT. Dalam kasus ini penulis menggunakan data yang di dapat di lapangan yaitu data SPT. Pada pembahasan penelitian ini lokasi penelitian terletak di proyek pembangunan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) Gorontalo, yang terletak di Kecamatan Anggrek, Kabupaten Gorontalo Utara.

Lokasi dan Pengumpulan Data

1. Data Tanah

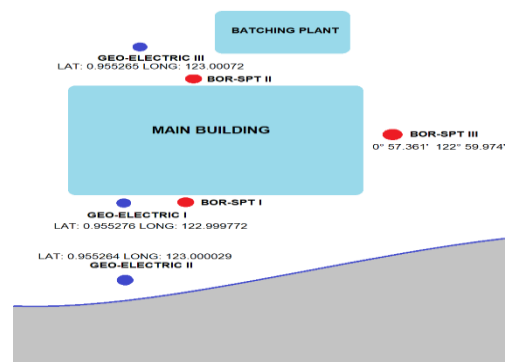
Dalam menganalisis data tanah penulis mengambil dari data in-situ test yang dilakukan oleh CV.INDOSAFAX di lokasi proyek pembangunan PLTU Gorontalo. Data-data yang diperlukan untuk menganalisis potensi likuifaksi yaitu data yang berkaitan dengan sifat fisik tanah, sifat mekanis tanah, dan hasil dari pengujian *Standard Penetration Test* (SPT).

2. Data Gempa

Dalam memperoleh data percepatan gempa yang ada sesuai lokasi penelitian yang terletak di proyek pembangunan PLTU Gorontalo, diambil respon spektra

dari situs puskim. Pada situs tersebut tersedia data percepatan gempa sesuai permintaan lokasi yang dimasukkan di pencarian dengan memasukkan koordinat lokasi yang akan ditinjau, pada penelitian ini terdapat dua lokasi koordinat yang akan ditinjau yakni koordinat BH 1 ($0^{\circ} 57' 19.9008''$ N, $122^{\circ} 59' 59.1792''$ E) dan koordinat BH 3 ($1^{\circ} 3' 1.008''$ N $123^{\circ} 15' 14.0004''$ E). Untuk variasi gempa yang digunakan dalam penelitian ini diambil gempa Mw mulai dari 7.0, 7.4, 7.8, 8.0 data variasi gempa didapat dari website resmi USGS.

Lokasi Penelitian



Gambar 2. Peta Lokasi PLTU Gorontalo

Cara Analisis

Dalam menganalisis potensi likuifaksi di proyek pembangunan PLTU Gorontalo dilakukan dengan :

1. Menganalisis jenis dan sifat lapisan tanah.
2. Menghitung percepatan gempa di muka tanah.
3. Mengitung tegangan-teganagn yang ada di tanah.
4. Menghitung nilai CSR.
5. Menghitung nilai CRR.
6. Menghitung nilai *Safety Factor* berdasarkan nilai CSR dan CRR.

Analisis Likuifaksi

Dalam menganalisis suatu potensi likuifaksi perlu suatu nilai yang menentukan apakah suatu tanah bisa terjadi potensi likuifaksi. Nilai yang menjadi pegangan untuk mengetahui potensi likuifaksi disebut dengan nilai faktor keamanan, seperti yang dijelaskan pada bab 2 landasan teori. Nilai faktor keamanan <

1 menyatakan bahwa tanah tersebut mengalami terjadinya potensi likuifaksi, nilai = 1 menyatakan tanah tersebut dalam kondisi kritis, sedangkan nilai faktor keamanan > 1 menyatakan bahwa potensi likuifaksi tidak akan terjadi. Dalam menganalisis nilai-nilai faktor keamanan dibutuhkan pengevaluasian nilai terlebih dahulu. Nilai-nilai yang harus dievaluasi yakni nilai CSR (*Cyclic Stress Ratio*) dan nilai CRR (*Cyclic Resistance Ratio*) yang diformulirkan sebagai berikut:

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

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Tanah

Melalui pemeriksaan SPT di lapangan di titik BH 1 dan BH 3 didapat data tanah seperti pada tabel 2 dan 3 berikut:

Tabel 2. Data Tanah Pengujian SPT BH 1

Lapisan Tanah Ke	Deskripsi Jenis Tanah	Nilai N - SPT	Tebal Lapisan Tanah (m)	di/Ni
1	Gravelly Sandy Clay, Gray	8.00	1.5	0.1875
2	Gravelly Sandy Clay, Gray	18.00	1.5	0.083333
3	Gravelly Sandy Clay, Gray	18.00	1.5	0.083333
4	Gravelly Sandy Clay, Gray	20.00	1.5	0.075
5	Gravelly Sandy Clay, Gray	20.00	1.5	0.075
6	Sandy Clay, Gray	21.00	1.5	0.071429
7	Sandy Clay, Gray	27.00	1.5	0.055556
8	Reef/ Sandy Clay, Light Gray	34.00	1.5	0.044118
9	Reef, Light Gray	40.00	1.5	0.0375
Σ			13.5	0.712768
N̄			Σdi/(Σdi/Ni)	18.9402

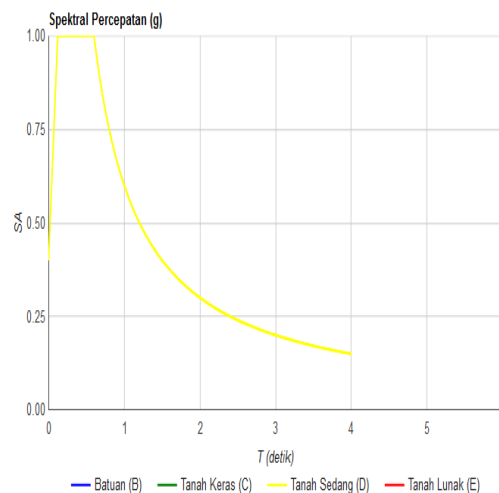
Tabel 3. Data Tanah Pengujian SPT BH 3

Lapisan Tanah Ke	Deskripsi Jenis Tanah	Nilai N - SPT	Tebal Lapisan Tanah (m)	di/Ni
1	Silty Sandy Clay, Dark Brown	8.00	1.5	0.1875
2	Silty Sandy Clay, Dark Brown	8.00	1.5	0.1875
3	Silty Sandy Clay, Dark Brown	10.00	1.5	0.15
4	Silty Sandy Clay, Dark Brown	12.00	1.5	0.125
5	Silty Sandy Clay, Dark Brown	17.00	1.5	0.088235
6	Silty Sandy Clay, Dark Brown	20.00	1.5	0.075
7	Silty Sandy Clay, Dark Brown	25.00	1.5	0.06
8	Silty Sandy Clay, Dark Brown	30.00	1.5	0.05
9	Sandy Reef, Light Gray	37.00	1.5	0.040541
Σ			13.5	0.963776
N̄			Σdi/(Σdi/Ni)	14.00741

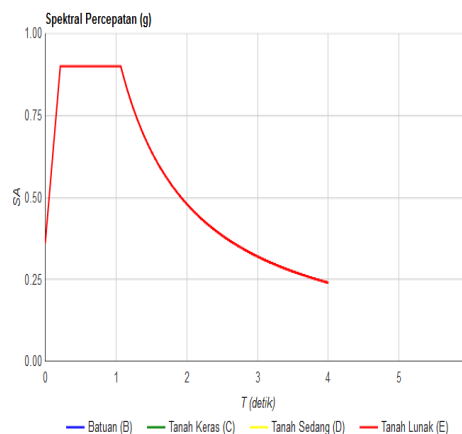
Dari hasil pemeriksaan data tanah di titik BH 1 dan BH 3 menunjukkan bahwa tanah di titik BH 1 tergolong dalam tanah sedang sedangkan tanah untuk BH 3 termasuk tanah lunak berdasarkan SNI 1726:2002.

Data Gempa

Data percepatan maksimum di permukaan (a_{max}) didapatkan dari situs desain spektra Indonesia, dengan memasukan koordinat lokasi tinjauan di PLTU Area Gorontalo, yaitu koordinat BH 1 terletak pada ($0^{\circ}57.19' 122^{\circ}59.59'$) dan koordinat BH 3 terletak pada ($0^{\circ}57.361' 122^{\circ}59.974'$). didapat nilai a_{max} di kedua titik seperti pada gambar 4 dan 5.



Gambar 4. Grafik Percepatan Gempa Maksimum di Titik BH 1



Gambar 5. Grafik Percepatan Gempa Maksimum di Titik BH 3

Dari kedua grafik pada gambar 4 dan 5 didapatkan nilai a_{max} di kedua titik, untuk titik BH 1 nilai $a_{max} = 1g$ dan untuk titik BH 3 nilai $a_{max} = 0.9g$.

Analisis Likuifaksi

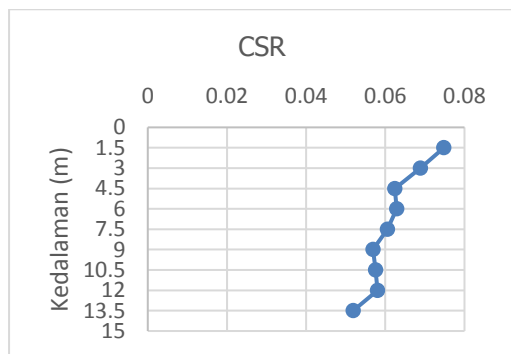
Menghitung Nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) Titik BH 1

Dalam menghitung nilai CSR terdapat parameter-parameter yang mempengaruhi nilai CSR, diantaranya nilai tegangan vertikal tital dan nilai tegangan vertikal efektif, dan nilai koefisien tegangan reduksi, berikut hasil perhitungan nilai CSR titik BH 1 yang dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Perhitungan Nilai CSR Titik BH 1

Lapisan	Kedalaman (m)	σ_v	σ'_v	amax	rd	CSR
1	1.5	26.7	11.985	1	0.50673	0.0748
2	3	56.7	27.27	1	0.49993	0.06887
3	4.5	92.52	48.375	1	0.49206	0.06236
4	6	119.88	61.02	1	0.48325	0.06291
5	7.5	152.7	79.125	1	0.47365	0.06057
6	9	191.7	103.41	1	0.46339	0.05692
7	10.5	215.25	112.245	1	0.45262	0.05751
8	12	237.36	119.64	1	0.4415	0.05804
9	13.5	293.76	161.325	1	0.43016	0.0519

Dari hasil perhitungan nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) Titik BH 1 pada tabel diatas bisa dilihat semakin dalam suatu lapisan tanah maka nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) semakin besar.



Gambar 6. CSR vs Kedalaman

Menghitung Nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) Titik BH 1

Dalam menghitung nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) terdapat beberapa parameter yang harus diperhitungkan yaitu nilai N-SPT yang dikoreksi efisiensi energi dan koreksi tegangan overburden (N1)₆₀, nilai CRR karena peningkatan *finer content* (N1)_{60cs}, nilai CRR pada skala gempa Mw = 7.5, dan nilai CRR pada skala gempa selain Mw = 7.5 dengan memakai koreksi *Magnitude Scalling Factor* (MSF). Parameter-parameter nilai yang diperhitungkan dalam menghitung nilai CRR titik BH 1 sebagai berikut.

Tabel 5. Nilai N-SPT yang dikoreksi 60% efisiensi energi

Kedalaman (m)	N-SPT	Koreksi N-SPT				(N1) ₆₀
		CE	CB	CR	CS	
1.5	8	1	1.05	1	1.3	6.552
3	18	1	1.05	1	1.3	14.742
4.5	18	1	1.05	1	1.3	14.742
6	20	1	1.05	1	1.3	16.38
7.5	20	1	1.05	1	1.3	16.38
9	21	1	1.05	1	1.3	17.199
10.5	27	1	1.05	1	1.3	22.113
12	34	1	1.05	1	1.3	27.846
13.5	40	1	1.05	1	1.3	32.76

Untuk nilai CN yaitu faktor koreksi tegangan overburden menggunakan persamaan 9, berikut nilai faktor (N1)₆₀ yang sudah dikoreksi nilai tekanan overburden (CN).

Tabel 6. Nilai (N1)₆₀ yang dikoreksi tegangan overburden

CN	N60	(N1) ₆₀
1.66686	6.552	10.9212
1.49385	14.742	22.0224
1.30661	14.742	19.262
1.21534	16.38	19.9072
1.10483	16.38	18.0972
0.98474	17.199	16.9365
0.94728	22.113	20.9471
0.91804	27.846	25.5638
0.78201	32.76	25.6188

Karena indikasi naiknya nilai CRR seiring meningkatnya nilai *finer content* (partikel halus) sehingga perlu dikoreksi lagi nilai (N1)₆₀ terhadap kandungan partikel halus. Untuk perhitungan nilai (N1)_{60cs} dapat dilihat pada tabel 7 sebagai berikut.

Tabel 7. Perhitungan nilai (N1)_{60cs}

α	β	(N1) _{60cs}
0	1	10.9212
0	1	22.0224
0	1	19.262
0	1	19.9072
0	1	18.0972
0	1	16.9365
0	1	20.9471
0	1	25.5638
0	1	25.6188

Selanjutnya hitung nilai CRR pada gempa skala Mw = 7.5, berikut hasil perhitungannya seperti pada tabel 8.

Tabel 8. Perhitungan Nilai CRR 7.5

Lapisan	Kedalaman (m)	CRR7.5
1	1.5	0.11634
2	3	0.07538
3	4.5	0.10178
4	6	0.09626
5	7.5	0.11031
6	9	0.11671
7	10.5	0.08642
8	12	0.03905
9	13.5	0.03855

Untuk perhitungan nilai Magnitude Scalling Factor (MSF) memakai persamaan 13. berikut hasil perhitungan nilai MSF.

Tabel 9. Perhitungan Nilai MSF

Menghitung Nilai MSF			
MSF7	MSF7.4	MSF7.8	MSF8
1.14104	1.02694	0.92369	0.87581

Kemudian hitung nilai CRR pada skala gempa selain 7.5 dengan menggunakan persamaan 12. Berikut hasil perhitungan nilai CRR pada variasi gempa Mw = 7.0, Mw = 7.4, Mw = 7.8, dan Mw = 8.0.

Tabel 10. Perhitungan nilai $K\sigma$ dan nilai CRR dengan Mw = 7, Mw = 7.4, Mw = 7.8, Mw = 8

Kedalaman (m)	CRR7.5	f	$K\sigma$	CRR7.0	MSF7.4	MSF7.8	MSF8
1.50	0.11634318	0.762742	0.36524	0.04849	0.04364	0.03925	0.03722
3.00	0.07537776	0.69336	0.67475	0.05803	0.05223	0.04698	0.04455
4.50	0.10177715	0.710612	0.94625	0.10989	0.0989	0.08896	0.08435
6.00	0.09626084	0.70658	1.13669	0.12485	0.11237	0.10107	0.09583
7.50	0.11030606	0.717893	1.35512	0.17056	0.1535	0.13807	0.13091
9.00	0.11671239	0.725147	1.60303	0.21348	0.19213	0.17282	0.16386
10.50	0.08641795	0.700081	1.71036	0.16865	0.15179	0.13653	0.12945
12.00	0.03905274	0.671226	1.78642	0.0796	0.07164	0.06444	0.0611
13.50	0.03854897	0.670883	2.06048	0.09063	0.08157	0.07337	0.06957

Kemudian hitung masing masing faktor keamanan pada setiap variable gempa yang pada penelitian ini dipakai mulai dari Mw = 7.0, Mw = 7.4, Mw = 7.8, Mw dan Mw = 8.0.

Tabel 11. Perhitungan Faktor Keamanan Pada Skala Gempa Mw = 7 dan amax = 1

Kedalaman (m)	FK
1.5	0.64822
3	0.84263
4.5	1.76231
6	1.98471
7.5	2.81612
9	3.75069
10.5	2.93249
12	1.37162
13.5	1.74629

Tabel 13. Perhitungan Faktor Keamanan Pada Skala Gempa Mw = 7.4 dan amax = 1

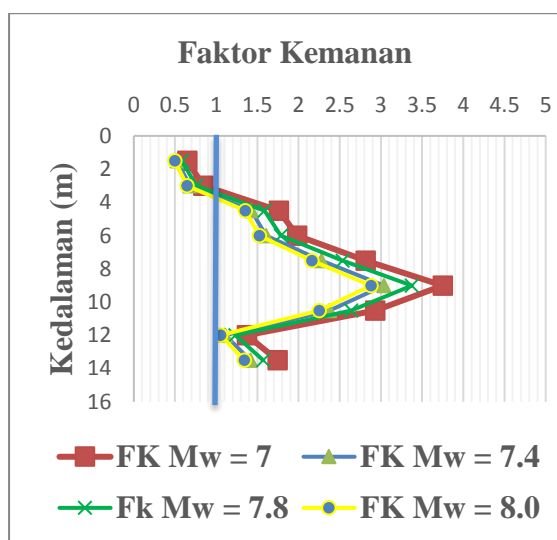
Kedalaman (m)	FK
1.5	0.5834
3	0.75837
4.5	1.58608
6	1.78624
7.5	2.5345
9	3.37562
10.5	2.63924
12	1.23446
13.5	1.57166

Tabel 14. Perhitungan Faktor Keamanan Pada Skala Gempa Mw = 7.8 dan amax = 1

Kedalaman (m)	FK
1.5	0.52474
3	0.68213
4.5	1.42662
6	1.60666
7.5	2.27969
9	3.03624
10.5	2.3739
12	1.11035
13.5	1.41365

Tabel 15. Perhitungan Faktor Keamanan Pada Skala Gempa Mw = 8.0 dan amax = 1

Kedalaman (m)	FK
1.5	0.49754
3	0.64677
4.5	1.35267
6	1.52338
7.5	2.16153
9	2.87887
10.5	2.25085
12	1.0528
13.5	1.34038



Gambar 7. Faktor Keamanan Pada Skala Gempa Mw = 7, Mw = 7.4, Mw = 7.8, dan Mw = 8.0 Titik BH 1

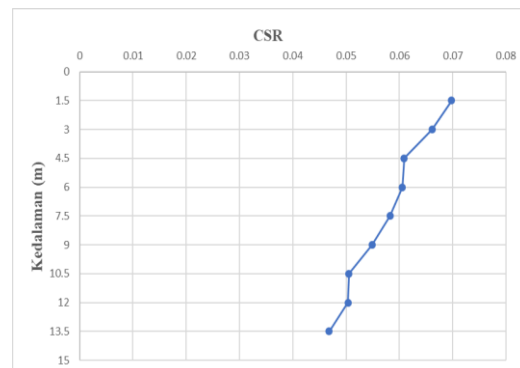
Menghitung Nilai Cyclic Stress Ratio (CSR) Titik BH 3

Sama seperti langkah-langkah perhitungan nilai CSR di titik BH 1, berikut hasil perhitungan nilai CSR titik BH 3.

Tabel 16. Perhitungan Nilai Cyclic Stress Ratio (CSR) Titik BH 3

Lapisan	Kedalaman (m)	σ_v	σ'_v	amax	rd	CSR
1	1.5	25.95	11.235	0.9	0.50673	0.0698
2	3	53.58	24.15	0.9	0.49993	0.06614
3	4.5	85.23	41.085	0.9	0.49206	0.06087
4	6	112.32	53.46	0.9	0.48325	0.06055
5	7.5	142.875	69.3	0.9	0.47365	0.05823
6	9	177.93	89.64	0.9	0.46339	0.05485
7	10.5	221.025	118.02	0.9	0.45262	0.05055
8	12	246.72	129	0.9	0.4415	0.05035
9	13.5	292.815	160.38	0.9	0.43016	0.04683

Dari hasil perhitungan nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) Titik BH 3 pada tabel diatas bisa dilihat semakin dalam suatu lapisan tanah maka nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) semakin kecil.



Gambar 8. CSR vs Kedalaman

Menghitung Nilai Cyclic Resistance Ratio (CRR) Titik BH 1

Dalam menghitung nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) titik BH 3, perhitungannya juga sama seperti di titik BH 1 terdapat beberapa parameter yang harus diperhitungkan yaitu nilai N-SPT yang dikoreksi efisiensi energi dan koreksi tegangan overburden (N1)60, nilai CRR karena peningkatan *finer content* (N1)60cs, nilai CRR pada skala gempa Mw = 7.5, dan nilai CRR pada skala gempa selain Mw = 7.5 dengan memakai koreksi *Magnitude Scalling Factor* (MSF). Parameter-parameter nilai yang diperhitungkan dalam menghitung nilai CRR titik BH 3 sebagai berikut.

Tabel 16. Nilai N-SPT Yang Dikoreksi 60% Efisiensi Energi

Kedalaman (m)	N-SPT	Koreksi N-SPT				(N)60
		CE	CB	CR	CS	
1.5	8	1	1.05	1	1.3	6.552
3	8	1	1.05	1	1.3	6.552
4.5	10	1	1.05	1	1.3	8.19
6	12	1	1.05	1	1.3	9.828
7.5	17	1	1.05	1	1.3	13.923
9	20	1	1.05	1	1.3	16.38
10.5	25	1	1.05	1	1.3	20.475
12	30	1	1.05	1	1.3	24.57
13.5	37	1	1.05	1	1.3	30.303

Untuk faktor koreksi tegangan overburden (CN), menggunakan persamaan 9, berikut hasil faktor koreksi CN pada tabel 17.

Tabel 17. Nilai (N1)₆₀ yang dikoreksi tegangan overburden

CN	N60	(N1) ₆₀
1.67638	6.552	10.9837
1.52619	6.552	9.99958
1.36574	8.19	11.1854
1.2683	9.828	12.4649
1.16218	13.923	16.181
1.04942	16.38	17.1895
0.92429	20.475	18.9249
0.88353	24.57	21.7084
0.78465	30.303	23.7772

Untuk menghitung nilai (N1)₆₀ yang memperhitungkan kandungan butir halus atau fines content (N1)_{60cs} pada setiap lapisan tanah di titik BH 3 digunakan persamaan 10. Berikut hasil perhitungan nilai(N1)_{60cs} sebagai berikut.

Tabel 18. Perhitungan Nilai (N1)_{60cs}

α	β	(N1) _{60cs}
0	1	10.9837
0	1	9.99958
0	1	11.1854
0	1	12.4649
0	1	16.181
0	1	17.1895
0	1	18.9249
0	1	21.7084
0	1	23.7772

Kemudian hitung CRR pada gempa skala Mw = 7.5.

Tabel 19. Perhitungan Nilai CRR 7.5

Lapisan	Kedalaman (m)	CRR7.5
1	1.5	0.11658
2	3	0.11252
3	4.5	0.11731
4	6	0.12105
5	7.5	0.11968
6	9	0.1155
7	10.5	0.10445
8	12	0.07866
9	13.5	0.05677

Untuk perhitungan nilai Magnitude Scalling Factor (MSF) memakai persamaan 13. berikut hasil perhitungan nilai MSF.

Tabel 20. Perhitungan Nilai MSF

Menghitung Nilai MSF			
MSF7	MSF7.4	MSF7.8	MSF8
1.14104	1.02694	0.92369	0.87581

Hitung masing masing faktor keamanan titik BH 3 pada setiap variable gempa yang pada penelitian ini dipakai mulai dari Mw = 7.0, Mw = 7.4, Mw = 7.8, dan Mw = 8.

Tabel 21. Perhitungan Faktor Keamanan Pada Skala Gempa Mw = 7.0 dan amax =1

Kedalaman (m)	FK
1.5	0.68148
3	1.20171
4.5	1.9472
6	2.48993
7.5	3.04267
9	3.64579
10.5	4.1493
12	3.34008
13.5	2.87934

Tabel 22. Perhitungan Faktor Keamanan Pada Skala Gempa Mw = 7.4 dan amax =1

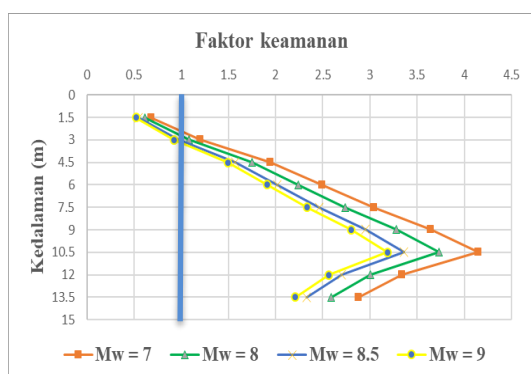
Kedalaman (m)	FK
1.5	0.61333
3	1.08154
4.5	1.75248
6	2.24094
7.5	2.7384
9	3.28121
10.5	3.73437
12	3.00607
13.5	2.59141

Tabel 23. Perhitungan Faktor Keamanan Pada Skala Gempa Mw = 7.8 dan amax =1

Kedalaman (m)	FK
1.5	0.55167
3	0.9728
4.5	1.57629
6	2.01564
7.5	2.46309
9	2.95133
10.5	3.35893
12	2.70385
13.5	2.33088

Tabel 24. Perhitungan Faktor Keamanan Pada Skala Gempa $M_w = 8.0$ dan $a_{max} = 1$

Kedalaman (m)	FK
1.5	0.52307
3	0.92238
4.5	1.49459
6	1.91117
7.5	2.33542
9	2.79835
10.5	3.18482
12	2.5637
13.5	2.21006



Gambar 9. Faktor Keamanan Pada Skala Gempa $M_w = 7$, $M_w = 7.4$, $M_w = 7.8$, dan $M_w = 8.0$ Titik BH 3

Penutup

Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini di dapat kesimpulan bahwa :

1. Data tanah yang didapatkan dari hasil pengujian *Standard Penetration Test* (SPT) pada titik BH 1 digolongkan kedalam tanah sedang berdasarkan klasifikasi tanah SNI-1726-2002, dengan nilai penetrasi rata-rata = 18.94023. sedangkan untuk titik BH 3

tergolong dalam tanah lunak karena nilai penetrasi rata-rata = 14.00741

2. Berdasarkan data percepatan gempa yang diambil dari situs puskim didapatkan percepatan gempa dipermukaan tanah di lokasi PLTU Area Gorontalo, pada titik BH 1 percepatan gempanya sebesar $1g$ sedangkan pada titik BH 3 diapat percepatan gempa sebesar $0.9g$.
3. Dari hasil perhitungan potensi likuifaksi, terjadi potensi likuifaksi pada lapisan tanah 1.5 m – 3 m untuk semua variasi gempa yang dipakai pada titik BH 1. Dan untuk titik BH 3 terjadi potensi likuifaksi untuk gempa $M_w = 7$ dan $M_w = 7.4$ terjadi potensi likuifaksi pada lapisan tanah 1.5 m, sedangkan untuk $M_w = 7.8$ dan $M_w = 8$ potensi likuifaksi terjadi pada lapisan tanah 1.5 m – 3 m.
4. Bertambahnya nilai magnitude gempa mengakibatkan potensi likuifaksi juga semakin besar.

Saran

Beberapa saran yang dapat disampaikan penulis sehubungan dengan penelitian ini adalah :

1. Penentuan terjadinya likuifaksi juga bisa dilakukan dengan pengujian gradasi butiran pada tanah, sehingga untuk penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengujian gradasi butiran halus di tiap lapisan tanah..
2. Dalam penelitian selanjutnya disarankan agar meninjau pengaruh potensi likuifaksi terhadap pondasi.

DAFTAR PUSTAKA

Abdulloh. (2019, 02 21). *Gampang Paham, Teori Lempeng Tektonik*. Retrieved from Anti Gempa Portal Informasi Teknologi Anti Gempa: <https://antigempa.com/gampang-paham-teori-lempeng-tektonik/>

- Ariandi, Emora Sesaro, Fabian J. Manoppo, J. R. Sumampouw. (2019). Kajian Potensi Likuifaksi Pada Sekitar Pondasi Jembatan Prategang Di Sawangan. *Jurnal Tekno*, Vol. 17, no 71, 2019, ISSN : 0215-9617.
- Christady, H. (2002). *Mekanika Tanah Jilid 1*. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.
- Das, B. M. (2007). *Principles of geotechnical engineering / Braja M. Das*. Retrieved 2 25, 2019
- Idriss, I. M., and R. W. Boulanger. (2008). *Soil Liquefaction During Earthquakes*. *Earthquake engineering Research Institute*. Engineering Research Institute.
- Ikhsan, R. (2011). Analisis Potensi Likuifaksi Dari Data CPT Dan SPT Dengan Studi Kasus PLTU Ende Nusa Tenggara Timur. *1057/FT.01/SKRIP/07/2011*.
- Ishihara, K. (1985). Stability of Natural Deposits During Earthquakes.
- Legrans, R. I. (2016). Studi Potensi Likuifaksi Berdasarkan Uji Penetrasi Standar (SPT) Di Pesisir Pantai Belang Minahasa Tenggara. *Teknik Vol.14/No.65/April 2016*.
- Lonteng, Christian Vicky Delfis, S. Balamba, S. Monintja, A. N. Sarajar. (2013). Analisis Potensi Likuifaksi di PT. PLN (PERSERO) UIP KIT SULMAPA PLTU 2 Sulawesi Utara 2 X 25 MW Power Plan. *Jurnal Sipil Statik vol. 1 No.11, Oktober 2013 (705-717) ISSN: 2337-6732*.
- Mabrur, M. (2009). Analisa Potensi Likuifaksi Pada Area Apron Bandar Udara Medan Baru.
- Pusat studi Gempa Nasional, Pusat Litbang Perumahan dan permukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2017). PETA SUMBER DAN BAHAYA GEMPA INDONESIA TAHUN 2017. ISBN 978-602-5489-01-3.
- Seed, H. B., Makdisi, F., Idriss, I. M., and Lee, K.L. (1975). (n.d.). The slides in the San Fernando Dams during the earthquake of february, 9,1971. . *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 13:7, 707-716.
- SNI-1726-2002. (n.d.). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk bangunan gedung*
- Tijow, Kurnia Christy, Oktovian B. A. Sompie, Jack H. Ticoh. (2018). Analisis Potensi Likuifaksi Tanah Berdasarkan Data Standard Penetration Test (SPT) Studi Kasus : Dermaga Bitung, Sulawesi Utara. *Jurnal Sipil Statik vol. 6 No.7 Juli 2018 (491-500) ISSN: 2337-6732*.

Halaman ini sengaja dikosongkan