

ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI PADA GEMPA MAGNITUDO 6, 7.5, 8, DAN 8.7 DENGAN PARAMETER DATA PENGUJIAN *STANDARD PENETRATION TEST* (SPT) (STUDI KASUS : KOTA PALU, PROVINSI SULAWESI TENGAH)

Ivan Ade Sofiyan¹, Chandra Afriade Siregar², Didin Kusdian³

Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Sangga Buana YPKP, Jl. PHH. Hasan Mustopa No.68 Cikutra, Bandung, Jawa Barat, Indonesia ^{1, 2, 3}

Email : mgeoteknikamandiri@gmail.com¹, chandra.afriade@usbypkp.ac.id²

Abstrak

Kota Palu, yang terletak di Provinsi Sulawesi Tengah, merupakan wilayah dengan aktivitas seismik yang tinggi dan memiliki kerentanan terhadap fenomena likuifaksi. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi likuifaksi akibat gempa bumi dengan variasi magnitudo 6, 7.5, 8, dan 8.7 menggunakan parameter hasil pengujian *Standard Penetration Test* (SPT). Metode analisis mengacu pada pendekatan faktor keamanan terhadap likuifaksi (*Safety Factor of Liquefaction*) berdasarkan korelasi nilai N-SPT, kedalaman tanah, serta kondisi air tanah. Data SPT yang digunakan merupakan data sekunder dari beberapa titik uji di wilayah Kota Palu. Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan magnitudo gempa secara signifikan menurunkan faktor keamanan terhadap likuifaksi. Pada magnitudo 6, sebagian besar lokasi menunjukkan potensi rendah, namun pada magnitudo 7.5 ke atas, terjadi penurunan nilai faktor keamanan yang mengindikasikan potensi likuifaksi sedang hingga tinggi di beberapa lokasi. Studi ini memberikan informasi penting sebagai dasar mitigasi risiko dan perencanaan infrastruktur di daerah rawan gempa.

Kata Kunci : Likuifaksi, Gempa, Magnitudo, *Standard Penetration Test* (SPT).

1. Pendahuluan

Pada letak geografisnya, Indonesia merupakan daerah yang rawan terjadi gempa bumi, hal itu disebabkan karena Indonesia dilalui oleh 3 lempeng tektonik, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik (Alfaqikh & Zayadi, 2022). Tentunya dengan kondisi letak geografis tersebut, Indonesia akan sering dilanda gempa pada mayoritas wilayahnya. Dengan terjadinya gempa tersebut maka akan berpengaruh besar terhadap suatu konstruksi atau struktur bangunan. Dalam mitigasinya tentunya pada tahap awal suatu desain pondasi atau bangunan harus memperhitungkan efek gempanya, dan harus bisa tahan terhadap guncangan suatu gempa, setidaknya masih ada batas aman evakuasi ketika dilanda bencana gempa yang besar sebelum struktur tersebut hancur.

Selama historis pada Provinsi Sulawesi Tengah, daerah tersebut pernah dilanda bencana gempa yang cukup besar dan menimbulkan banyak kerusakan struktur bangunan. Dalam laporan CNBC Indonesia, peneliti Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) telah memprediksi beberapa wilayah Indonesia akan mengalami gempa berkekuatan magnitudo di atas 8 dan daerah Sulawesi merupakan salah satu yang berpotensi terkena dampaknya juga. Selain dari pada itu, Institut Teknologi Bandung (ITB) juga melalui kepala laboratorium geodesi menyatakan prediksinya mengenai gelombang tsunami yang cukup besar di pesisir pantai dan sekitarnya. Hasil permodelan tersebut didapat bahwa potensi yang terjadi yaitu kekuatan gempa sebesar magnitudo 8,7 – 9 dan potensi tambahan yaitu terjadi tsunami dengan ketinggian 20 meter (CNBC Indonesia, 2022).

Gempa bumi dapat mengakibatkan kegagalan struktur dan hilangnya kestabilan tanah. Kerusakan-kerusakan yang timbul akibat gempa bumi dapat dikategorikan menjadi dua bagian pokok, yaitu kerusakan pada bangunan-bangunan di atas tanah dan kerusakan lingkungan fisik pada permukaan dalam tanah itu sendiri (Tijow, Sompie, & Ticoh, 2018). Selain dari pada itu, efek gempa berskala besar tentunya dapat memicu bencana tambahan yaitu seperti likuifaksi. Likuifaksi adalah sebuah peristiwa perubahan kondisi tanah dari keadaan padat (*solid*) menjadi cairan (*liquid*) (Hakam, 2020). Likuifaksi telah menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari kajian potensi bahaya gempa di wilayah dengan karakteristik tanah berupa pasir urai dan jenuh air (Misliniyati & Amrina, 2023). Hal tersebut sering terjadi saat gempa bumi dalam skala besar pada kondisi tanah mayoritas pasir (*sand*) lepas dan muka air tanah yang dangkal. Untuk itu dalam perencanaan pondasi tentunya harus menghitung juga efek likuifaksinya seperti apa, dan bagaimana gaya momen yang akan terjadi pada pondasi jika terjadi likuifaksi.

Pada kasus tersebut penulis mengambil data sampel di Palu, Sulawesi Tengah. Data tersebut dipilih karena Kota Palu sempat terjadi masalah likuifaksi. Maka dalam kasus ini penulis berencana mengkaji tentang kemungkinan kembalinya terjadi likuifaksi serta menyesuaikan desain pondasi yang cocok untuk dapat mengatasi efek seismik dan likuifaksi yang terjadi.

1.2 Rumusan Masalah

Pada pembahasan ini tentunya tidak luput dari berbagai masalah yang harus dipecahkan, untuk itu penulis menyusun beberapa rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana klasifikasi tanah yang terdapat pada area tersebut?
2. Berapa nilai CRR dan CSR dari hasil pengujian tanah tersebut? dan bagaimana koreksi N-SPT nya?
3. Apakah dengan skala magnitudo 6, 7.5, 8, dan 8,7 dapat terjadi likuifaksi? dan pada kedalaman berapa potensi likuifaksi dapat terjadi?

2.2 Tujuan Penelitian

Setelah terdapat beberapa rumusan masalah maka tentunya harus diselesaikan juga dengan tujuan dari pembahasan tersebut sebagai berikut:

1. Untuk dapat menganalisis klasifikasi tanah pada titik lokasi tersebut, yang mana data tersebut akan menjadi acuan perhitungan selanjutnya.
2. Untuk dapat menganalisis nilai koreksi N-SPT yang telah diuji dan dijadikan dasar dalam menghitung nilai *cyclic stress ratio* dan *cyclic resistance ratio*.
3. Untuk mengetahui apakah dengan skala magnitudo 6, 7.5, 8, dan 8,7 dapat terjadi likuifaksi, dan menganalisis masing-masing lapisan tanah sedalam titik sampel pengujian.

2. Kajian Pustaka

2.1 Pengertian Likuifaksi

Likuifaksi adalah sebuah peristiwa perubahan kondisi tanah dari keadaan padat (*solid*) menjadi cairan (*liquid*). Likuifaksi sering dijumpai pada kejadian gempa bumi di mana terjadi perilaku tanah akibat bawah beban gempa yang terjadi hanya dalam waktu yang singkat. (Hakam, 2020). Proses fenomena likuifaksi ini disebabkan oleh kenaikan tekanan air dalam tanah secara tiba-tiba selama gempa, yang mengakibatkan penurunan gaya geser antar partikel tanah, sehingga menyebabkan kehilangan kontak antarpartikel dan mengurangi kekuatan serta kekakuan tanah secara drastis.

Dampak likuifaksi dapat berupa penurunan permukaan tanah, kerusakan pada struktur bangunan dan infrastruktur, serta meningkatkan risiko longsor dan pergerakan tanah yang berbahaya. Menurut Hakam, et al., (2022) likuifaksi dibagi menjadi 4 jenis sebagai berikut:

1. *Flow Liquefaction*, adalah bergesernya permukaan lebih dari 1 kilometer seperti yang terjadi di Palu pada 2018.
2. *Cyclic Mobility*, adalah fenomena pencairan yang dipicu oleh pembebanan siklik yang terjadi pada endapan tanah dengan tegangan

geser statis yang lebih rendah dari kekuatan tanah.

3. *Lateral Spreading*, adalah bergesernya permukaan tanah hingga ratusan meter.
4. *Sand Boiling*, biasanya ditandai dengan keluarnya pasir di suatu daerah dan turunnya permukaan yang lain sehingga bangunan di atasnya mengalami kemiringan. (Hakam, Yuliet, Repadi, & Novasari, 2022)

2.2 Cyclic Stress Ratio (CSR)

Seed dan Idris (1971) mengembangkan metode dengan membandingkan rasio tegangan siklik yang dihasilkan oleh gempa bumi yang dikenal sebagai *Cyclic Stress Ratio* (CSR), dengan rasio ketahanan siklik tanah yang disebut *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) (Seed & Idriss, 1971). Untuk itu nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = 0,65 \cdot \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \cdot r_d \quad [1]$$

Di mana :

CSR = *Cyclic stress ratio* atau tegangan siklik penyebab likuifaksi

τ_{max} = Tegangan geser siklik

a_{max} = Percepatan permukaan tanah maksimum arah horizontal (m/s^2)

σ_v = Tegangan total *overburden* arah vertikal (t/m^2)

σ'_v = Tegangan efektif *overburden* arah vertikal (t/m^2)

r_d = Koefisien reduksi kedalaman

g = Percepatan gravitasi ($9,81 m/s^2$)

2.3 Cyclic Resistance Ratio (CRR)

Berdasarkan metode yang dikembangkan oleh NCEER/NSF pada 1998 untuk menganalisis ketahanan tanah terhadap likuifaksi, metode *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) didasarkan pada nilai hasil *Standard Penetration Test* (SPT). Metode ini telah diuji selama bertahun-tahun dan menghasilkan kurva yang menggambarkan hubungan antara nilai SPT yang telah dikoreksi untuk tagangan efektif (N_1)₆₀ dengan nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR). Untuk itu dalam perhitungannya

nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dapat dihitung dengan persamaan berikut :

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

Di mana :

CRR = *Cyclic resistance ratio* atau kemampuan tanah menahan likuifaksi

(N_1)_{60.cs} = Nilai SPT yang telah dikoreksi dan penyetaraan nilai *clean sand*

2.4 Nilai SPT Koreksi dan Clean Sand

Untuk nilai *Standar Penetration Test* (SPT) yang telah dikoreksi dan juga untuk yang penyetaraan nilai *clean sand*, yang mana sudah diformulasikan persamaannya oleh Youd, et al., (2001) sebagai berikut:

$$(N_1)_{60.cs} = \alpha + \beta \cdot (N_1)_{60} \quad [3]$$

Di mana α dan β merupakan koefisien determinan dengan mengikuti persamaan sebagai berikut :

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

Jika $5\% \leq FC \leq 35\%$ maka

$$\alpha = \exp \left[1,76 - \left(\frac{190}{FC^2} \right) \right] \quad [4]$$

$$\beta = \left[0,99 + \left(\frac{FC^{1,5}}{1000} \right) \right] \quad [5]$$

Jika $FC \geq 35\%$ maka $\alpha = 5$, $\beta = 1,2$

Untuk nilai (N_1)₆₀ didapatkan dengan formulasi yang dikembangkan dan modifikasi oleh Skempton (1986).

$$(N_1)_{60} = N_m \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \quad [6]$$

Di mana :

N_m = N-SPT hasil tes lapangan

C_N = Faktor normalisasi N_m terhadap tegangan *overburden*

C_E = Koreksi rasio energi *hammer*

C_B = Koreksi untuk diameter lubang bor

C_R = Koreksi dari panjang batang
 C_S = Koreksi metode pengambilan sampel

Tabel 1.
Koreksi Nilai SPT Skempton 1986

Factor	Equipment Variable	Term	Correction
Overburden pressure	-	C_N	$\left(\frac{p_a}{\sigma'_v}\right)^{0,5}$
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	1,00
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	0,80
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	1,00
Sampling method	Standard sampler	C_S	1,00
Sampling method	Sampler without liners	C_S	1,1 - 1,3

2.5 Nilai Koefisien Reduksi Kedalaman

Dimana z adalah kedalaman di bawah permukaan tanah dalam satuan meter. Untuk memudahkan penggunaan perangkat lunak, Blake (1996) mengusulkan hubungan sebagai berikut (Youd, et al., 2001).

$$r_d = \frac{1,000 - 0,4113 \cdot z^{0,5} + 0,04052 \cdot z + 0,001753 \cdot z^{1,5}}{1,000 - 0,4177 \cdot z^{0,5} + 0,05729 \cdot z - 0,006205 \cdot z^{1,5} + 0,00121 \cdot z^2} \quad [7]$$

2.6 Tegangan Overburden Total

Tegangan *overburden* dalam metode Terzaghi and Peck memiliki persamaan sebagai berikut.

$$\sigma_v = \gamma_t \cdot z \quad [8]$$

Di mana :

σ_v = Tegangan *overburden* total (kN/m² atau Ton/m²)

γ_t = Berat jenis tanah (kN/m³ atau Ton/m³)

z = Kedalaman dari muka tanah (m)

2.7 Tegangan Air Pori

Tegangan pori dalam metode Terzaghi and Peck memiliki persamaan sebagai berikut.

$$\mu = \gamma_w \cdot h_w \quad [9]$$

Di mana :

μ = Tegangan air pori (kN/m² atau Ton/m²)

γ_w = Berat jenis air (kN/m³ atau Ton/m³)

h_w = Kedalaman air dari permukaan tanah ke titik tegangan dihitung (m)

2.8 Tegangan Overburden Efektif

Tegangan *overburden* efektif adalah tekanan yang bekerja pada butiran tanah, dengan mengabaikan tekanan air pori. Dalam metode Terzaghi and Peck persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$\sigma'_v = \sigma_v - \mu \quad [10]$$

Di mana :

μ = Tegangan air pori (kN/m² atau Ton/m²)

σ_v = Tegangan *overburden* total (kN/m² atau Ton/m²)

σ'_v = Tegangan *overburden* efektif (kN/m² atau Ton/m²)

2.9 Perhitungan CRR dengan Variasi Nilai Magnitudo Gempa

Persamaan yang diberikan oleh Seed & Idris dan hasil koreksi dari Boulanger & Idris sebagai berikut :

$$CRR_{M_W} = CRR_{M=7,5} \cdot MSF \cdot K_\sigma \cdot K_a \quad [11]$$

Di mana :

CRR_{M_W} = Nilai CRR pada magnitudo rencana

$CRR_{M=7,5}$ = Nilai CRR pada magnitudo $M = 7,5$

MSF = Faktor skala magnitudo

K_{σ} = Faktor koreksi tegangan
overburden

K_a = Faktor koreksi tegangan
statis awal

Beberapa studi dilakukan oleh Idriss & Boulanger (2003a, 2003b) meyakini bahwa hasil-hasil ini dapat digunakan. Dan karena lapisan tanah dianggap horizontal maka nilai K_a dalam studi ini yaitu 1,00 (Kamel & Badreddine, 2022).

2.10 Magnitude Scaling Factor (MSF)

Untuk menentukan kekuatan magnitudo yang lebih dan atau kurang dari 7,5. Idriss & Boulanger (2008) mengemukakan persamaan yaitu sebagai berikut.

$$MSF = 6,9 \cdot \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 0,058 \leq 1,8 \quad [12]$$

Di mana :

MSF = Faktor skala magnitudo

M = Besaran magnitudo rencana

2.11 Faktor Koreksi Overburden

Idriss & Boulanger (2008) merekomendasikan perhitungan persamaan K_{σ} yang menggunakan data *Standar Penetration Test* (SPT) yaitu sebagai berikut.

$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) \leq 1,1 \quad [13]$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{18,9 - 2,55\sqrt{(N_1)_{60.cs}}} \leq 0,3 \quad [14]$$

Di mana :

K_{σ} = Faktor koreksi overburden

C_{σ} = Faktor koreksi tegangan
overburden

$(N_1)_{60.cs}$ = Nilai SPT yang telah
dikoreksi dan penyetaraan
nilai *clean sand*

2.12 Analisis Likuifaksi

Untuk formulasinya akan dihitung lebih lanjut dengan metode seed & Idriss, yaitu sebagai berikut.

$$FS = \frac{CRR_{MW}}{CSR} \quad [15]$$

Di mana :

FS = Skala faktor likuifaksi

CRR_{MW} = Nilai CRR pada magnitudo
rencana

CSR = Nilai *Cyclic Stress Ratio*

Jika $FS < 1$ (Terjadi likuifaksi)

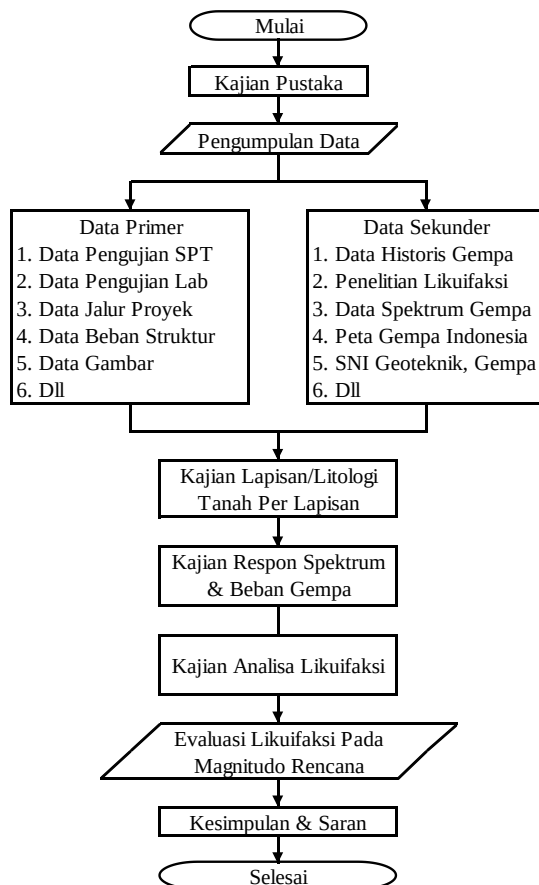
Jika $FS = 1$ (Kondisi kritis)

Jika $FS > 1$ (Tidak Terjadi Likuifaksi)

3. Objek dan Metode Penelitian

Pengambilan data sampel penelitian dilaksanakan di Kota Palu, Sulawesi Tengah. Daerah tersebut dipilih karena Kota Palu sempat terjadi masalah likuifaksi pada 18 September 2018. Rancangan atau tahapan perhitungan merupakan landasan metodologis yang penting dalam sebuah perencanaan / desain. Yang mana dapat membimbing penulis dalam proses pengolahan dan interpretasi data. Rancangan analisis mencakup langkah – langkah yang akan diambil untuk mengumpulkan data secara sistematis dan terarah. Ini melibatkan pemilihan teknik pengumpulan data yang sesuai dengan tujuan desain dan perhitungan.

Penelitian menganalisis klasifikasi tanah pada titik lokasi tersebut, yang mana data tersebut akan menjadi acuan perhitungan nilai koreksi N-SPT yang diuji dan dijadikan dasar dalam menghitung nilai *cyclic stress ratio* dan *cyclic resistance ratio*. Mengetahui apakah dengan skala magnitudo 6, 7,5, 8, dan 8,7 dapat terjadi likuifaksi, dan menganalisis masing-masing lapisan tanah sedalam titik sampel pengujian. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi likuifaksi akibat gempa bumi dengan variasi magnitudo 6, 7,5, 8, dan 8,7 menggunakan parameter hasil pengujian *Standard Penetration Test* (SPT).



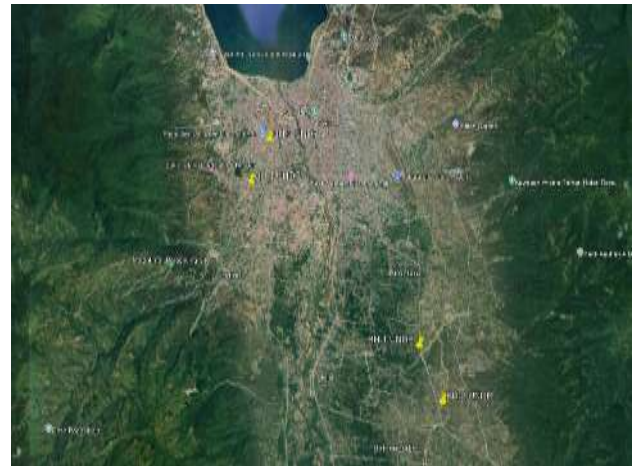
Gambar 1. Flow Chart Tahapan Desain

4. Hasil dan Pembahasan

Penentuan titik lokasi pengeboran (*boring hole/BH*) untuk pengujian *Standard Penetration Test* (SPT) dalam rangka analisis potensi likuifaksi di wilayah Provinsi Sulawesi Tengah dilakukan dengan pendekatan bertahap dan mempertimbangkan berbagai aspek teknis serta kondisi lapangan. Tahap perencanaan awal, jumlah titik yang direncanakan sebanyak 8 titik, dengan distribusi menyebar pada beberapa zona yang memiliki catatan sejarah kegempaan tinggi serta indikasi kerentanan tanah jenuh air terhadap guncangan.

Namun, setelah dilakukan studi pendahuluan yang mencakup interpretasi data geologi, peta seismotektonik, aksesibilitas lokasi, serta kondisi sumber daya di lapangan, maka dilakukan penyesuaian jumlah titik menjadi empat titik *boring hole*. Pengurangan

ini tetap mempertahankan prinsip keterwakilan area dan karakteristik litologi, dengan memastikan bahwa titik-titik yang dipilih berada pada lokasi-lokasi strategis yang secara geoteknik berpotensi mengalami fenomena likuifaksi.



Gambar 2. Titik Lokasi Pengujian Tanah Yang Dipilih Peta Pada Google Earth (Telah Dimodifikasi)

Masing-masing titik tersebut memiliki hasil pengujian tanah yang cukup lengkap yaitu, untuk pengujian lapangan digunakan *Standard Penetration Test* (SPT), sementara untuk pengujian lab yaitu pengujian *index properties*, *atterberg limits*, analisis saringan butir, kuat geser tanah, dan konsolidasi.

Tabel 2.
Data Hasil Pengujian SPT Lapangan

BH-01						BH-02						BH-03						BH-04											
Depth (m)		Grafik N - SPT				Soil Description	Depth (m)		Grafik N - SPT				Soil Description	Depth (m)		Grafik N - SPT				Soil Description	Depth (m)		Grafik N - SPT				Soil Description		
N	0	20	40	60		N	0	20	40	60		N	0	20	40	60		N	0	20	40	60							
0	0					0	0					0	0					0	0					0	0				
1	21				Gravelly Sand	1	36					1	13					1	12					1	12				Silty Sand
2	29					2	37						2	9					2	18					2	18			
3	17				Silty Sand	3	39					3	28					3	50					3	50				Gravelly Sand
4	22					4	40						4	8					4	50					4	50			
5	31				Gravelly Sand	5	44					5	8					5	50					5	50				Sandy Clay
6	34					6	39						6	14					6	17					6	17			
7	40				Gravelly Sand	7	22					7	28					7	27					7	27				Gravelly Sand
8	32					8	50						8	6					8	50					8	50			
9	37				Gravelly Sand	9	42					9	7					9	50					9	50				Gravelly Sand
10	50					10	37						10	6					10	50					10	50			
12	30				Silty Sand	12	28					12	50					12	50					12	50				Silty Clay
14	29					14	42						14	50					14	50					14	50			
16	36				Silty Sand	16	30					16	7					16	30					16	30				Gravelly Sand
18	33					18	31						18	50					18	50					18	50			
20	29					20	50					20	50					20	50					20	50				

Tabel 3.
Perhitungan Klasifikasi Situs E (Titik BH-01)

Lapisan Tanah	Persyaratan Klasifikasi Situs E									
	Tebal Lapisan (H)			Indeks Plastisitas (PI)			Kadar Air (W)			Kuat Geser Niralir (S_u)
	Sampel (m)	Syarat (m)	Keterangan	Sampel (%)	Syarat (%)	Keterangan	Sampel	Syarat	Keterangan	Sampel (kPa)
1.40 - 2.00	0.60	>3	TT	0	20	TT	1.05	≥40	TT	0
3.40 - 4.00	0.60	>3	TT	0	20	TT	10.24	≥40	TT	0
5.40 - 6.00	0.60	>3	TT	0	20	TT	13.48	≥40	TT	0
7.50 - 8.00	0.50	>3	TT	0	20	TT	16.49	≥40	TT	0
9.50 - 10.00	0.50	>3	TT	0	20	TT	14.66	≥40	TT	0
11.40 - 12.00	0.60	>3	TT	0	20	TT	4.01	≥40	TT	0
13.40 - 14.00	0.60	>3	TT	0	20	TT	8.93	≥40	TT	0
15.40 - 16.00	0.60	>3	TT	0	20	TT	11.14	≥40	TT	0
17.40 - 18.00	0.60	>3	TT	0	20	TT	12.85	≥40	TT	0
19.40 - 20.00	0.60	>3	TT	0	20	TT	18.20	≥40	TT	0

Berdasarkan hasil pemeriksaan klasifikasi situs E titik BH-01 pada tabel 3 dapat disimpulkan bahwa titik tersebut tidak memiliki tebal minimum yaitu 3 meter pada setiap sampelnya, juga mayoritas persyaratan lainnya pun tidak terpenuhi, maka titik tersebut tidak tergolong klasifikasi situs E.

Tabel 4.
Perhitungan Klasifikasi Situs A/B/C/D (Titik BH-01)

Lapisan No.	Klasifikasi Tanah	N_i (blow / m)	d_i (m)	d_i / N_i
1	Gravelly Sand	17	3.20	0.19
2	Silty Sand	29	2.30	0.08
3	Gravelly Sand	40	4.90	0.12
4	Silty Sand	31	9.60	0.31
Total			20.00	0.70
$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n N_i} =$				29

Dengan hasil akhir nilai $\bar{N} = 29$ menurut tabel klasifikasi situs (AASHTO, 2012) halaman 267 pada SNI 8460:2017, dapat disimpulkan untuk nilai $\bar{N} = 15$ s.d. 50 termasuk kelas situs D (tanah sedang). Dengan demikian pada titik BH-01 memiliki kategori kelas situs D (tanah sedang).

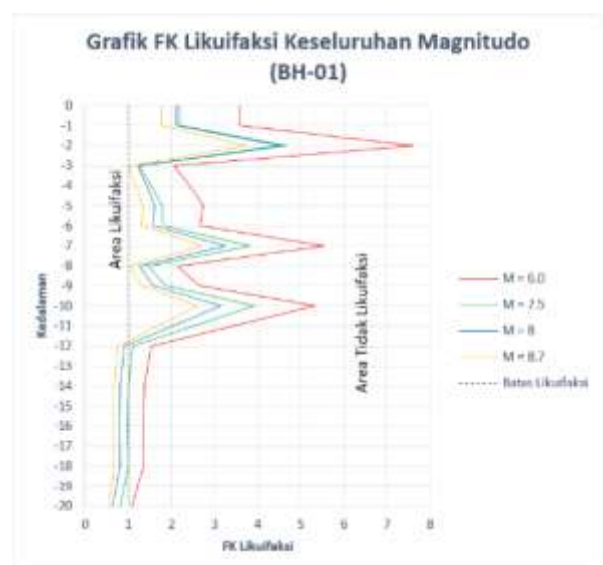
Tabel 5.
Rekap Klasifikasi Situs Keseluruhan

Titik	N-SPT Rata - Rata	Kelas Situs Tanah	Keterangan
BH-01	29	SD	Tanah Sedang
BH-02	36	SD	Tanah Sedang
BH-03	14	SE	Tanah Lunak
BH-04	37	SD	Tanah Sedang

Tabel 6.
Hasil Perhitungan CSR dan CRR (Titik BH-01)

Kedalaman (m)	CSR	Variasi CRR_{MW}					Skala Faktor Likuefaksi			
		$CRR_{M=6.0}$	$CRR_{M=7.5}$	$CRR_{M=8.0}$	$CRR_{M=8.7}$	$FS_{M=6.0}$	$FS_{M=7.5}$	$FS_{M=8.0}$	$FS_{M=8.7}$	
1	0.215	0.772	0.474	0.456	0.378	3.586	2.200	2.120	1.757	TL
2	0.214	1.630	1.000	0.963	0.798	7.627	4.680	4.508	3.737	TL
3	0.212	0.437	0.268	0.258	0.214	2.061	1.265	1.218	1.010	KK
4	0.211	0.512	0.324	0.302	0.251	2.429	1.540	1.436	1.190	TL
5	0.209	0.571	0.375	0.338	0.280	2.732	1.793	1.615	1.338	TL
6	0.207	0.554	0.376	0.328	0.272	2.672	1.814	1.580	1.309	TL
7	0.224	1.240	0.857	0.733	0.608	5.543	3.833	3.277	2.716	TL
8	0.237	0.505	0.351	0.298	0.247	2.132	1.482	1.260	1.045	KK
9	0.247	0.652	0.461	0.386	0.320	2.642	1.866	1.562	1.295	TL
10	0.254	1.357	1.000	0.802	0.665	5.341	3.936	3.157	2.617	TL
12	0.260	0.398	0.286	0.235	0.195	1.532	1.102	0.905	0.750	L
14	0.255	0.350	0.255	0.207	0.171	1.369	0.996	0.809	0.670	L
16	0.245	0.325	0.239	0.192	0.159	1.327	0.977	0.784	0.650	L
18	0.233	0.317	0.236	0.187	0.155	1.358	1.012	0.803	0.665	L
20	0.223	0.242	0.179	0.143	0.119	1.086	0.804	0.642	0.532	L

Berdasarkan Tabel 6 dapat disimpulkan bahwa pada titik BH-01 mengalami likuefaksi pada kedalaman tertentu. Adapun grafiknya sebagai berikut ini :

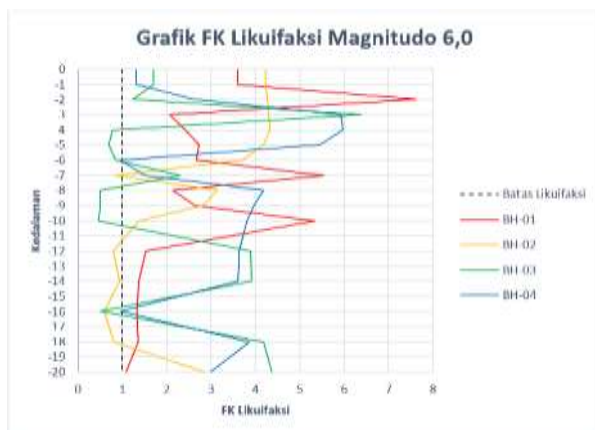


Gambar 3. Grafik Skala Faktor Likuefaksi (FS) Titik BH-01

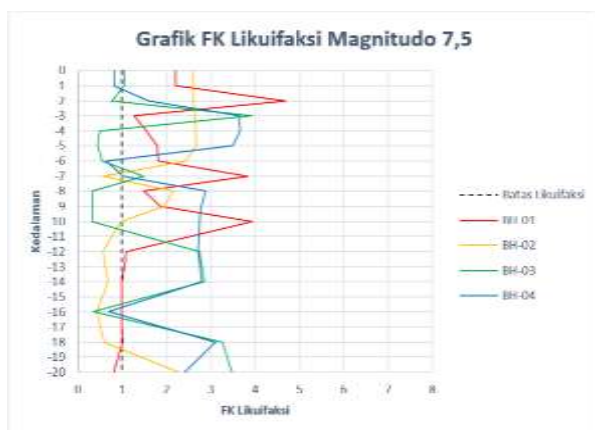
Setelah dihitung ulang pada titik sampel BH-02, BH-03 dan BH-04, maka didapat hasil untuk keseluruhan sampel rata-rata mengalami likuifaksi.

Tabel 7.
Hasil Perhitungan Analisis Potensi Likuifaksi
(Semua Titik Sampel)

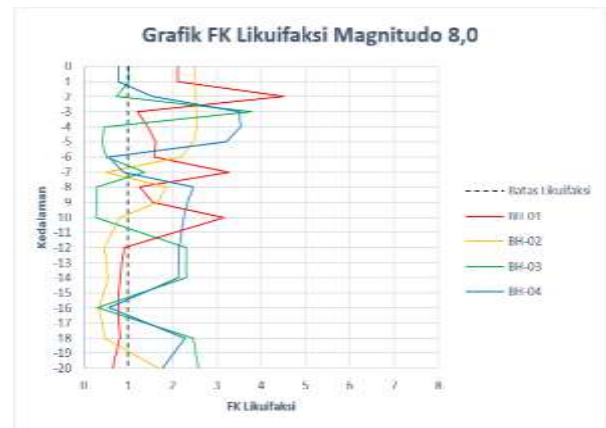
Kedalaman (m)	Keterangan Potensi Likuifaksi (FS)															
	M = 6,0				M = 7,5				M = 8,0				M = 8,7			
	BH-01	BH-02	BH-03	BH-04	BH-01	BH-02	BH-03	BH-04	BH-01	BH-02	BH-03	BH-04	BH-01	BH-02	BH-03	BH-04
1	TL	TL	TL	TL	TL	TL	KK	L	TL	TL	KK	L	TL	TL	L	L
2	TL	TL	TL	TL	TL	L	TL	TL	TL	L	TL	TL	TL	TL	L	TL
3	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	KK	TL	TL	TL	L
4	TL	TL	L	TL	TL	L	TL	TL	TL	L	TL	TL	TL	TL	L	TL
5	TL	TL	L	TL	TL	L	TL	TL	TL	L	TL	TL	TL	TL	L	TL
6	TL	TL	L	L	TL	L	TL	TL	TL	L	L	TL	TL	TL	L	L
7	TL	L	TL	TL	TL	L	KK	TL	L	L	TL	L	TL	L	L	L
8	TL	TL	L	TL	TL	L	TL	TL	TL	L	TL	KK	TL	L	L	TL
9	TL	TL	L	TL	TL	L	TL	TL	TL	L	TL	TL	TL	TL	L	TL
10	TL	TL	L	TL	TL	L	L	TL	TL	L	L	TL	TL	L	L	TL
12	TL	L	TL	TL	L	L	TL	TL	L	L	TL	L	L	L	L	TL
14	TL	L	TL	TL	L	L	TL	TL	L	L	TL	TL	L	L	L	TL
16	TL	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
18	TL	L	TL	TL	KK	L	TL	TL	L	L	TL	L	L	L	L	TL
20	KK	TL	TL	TL	L	TL	TL	TL	L	TL	TL	L	L	TL	TL	TL



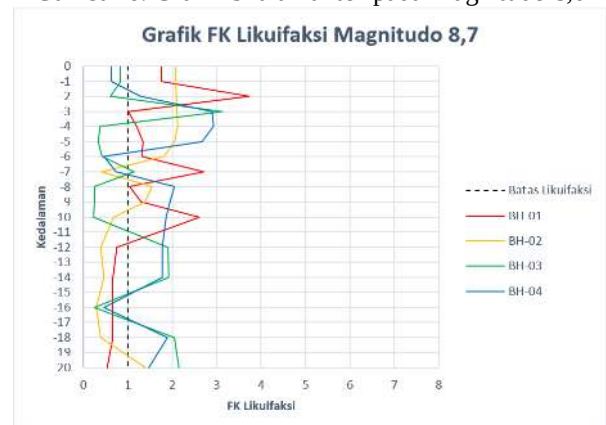
Gambar 4. Grafik Skala Faktor pada Magnitudo 6,0



Gambar 5. Grafik Skala Faktor pada Magnitudo 7,5



Gambar 6. Grafik Skala Faktor pada Magnitudo 8,0



Gambar 7. Grafik Skala Faktor pada Magnitudo 8,7

Berdasarkan hasil analisis nilai Faktor Keamanan (FK) terhadap potensi likuifaksi pada empat titik boring (BH-01 hingga BH-04) dengan variasi skenario magnitudo gempa (6.0, 7.5, 8.0, dan 8.7) ditemukan pola distribusi zona likuifaksi yang bervariasi secara vertikal maupun horizontal.

Pada magnitudo 6,0, mayoritas lapisan tanah di keempat titik menunjukkan nilai FK > 1, yang berarti kondisi tidak likuifaksi (TL). Namun demikian, indikasi likuifaksi (L) mulai muncul pada kedalaman dangkal sampai menengah di BH-03 dan BH-04, khususnya pada lapisan ke-4 hingga ke-10. Titik BH-01 menunjukkan satu lapisan dengan kondisi kritis (KK) di kedalaman 20 meter.

Saat simulasi gempa dinaikan ke magnitudo 7,5, jumlah lapisan dengan potensi likuifaksi meningkat secara signifikan, terutama pada BH-03 dan BH-04. BH-03 mulai menunjukkan nilai FK < 1 pada hampir semua kedalaman dangkal,

termasuk satu lapisan yang masuk kategori kondisi kritis (KK). Sementara itu, BH-04 menunjukkan kombinasi antara lapisan TL dan L, dengan satu lapisan KK di kedalaman sekitar 7 meter.

Pada skenario magnitudo 8,0, dominasi lapisan tanah dengan potensi likuifaksi (L) semakin nyata, terutama di titik BH-03 yang hampir seluruh kedalamannya masuk kategori L. BH-01 dan BH-04 mulai menunjukkan lebih banyak lapisan dengan nilai $FK < 1$, meskipun beberapa lapisan dangkal masih tergolong aman. BH-03 kembali menunjukkan nilai FK kritis pada kedalaman 1 meter.

Puncaknya, pada magnitudo 8,7, seluruh titik boring mengalami peningkatan jumlah lapisan yang rawan likuifaksi. Titik BH-03 menjadi yang paling rentan, dengan hampir semua lapisan masuk kategori L, sedangkan BH-01 dan BH-04 menunjukkan kombinasi antara L dan TL, serta masing-masing memiliki satu hingga dua lapisan kondisi kritis (KK).

5. Kesimpulan dan Rekomendasi

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi likuifaksi berdasarkan data uji Standard Penetration Test (SPT) pada empat titik bor (BH-01, BH-02, BH-03, dan BH-04) yang tersebar di wilayah terdampak gempa besar tahun 2018 di Provinsi Sulawesi Tengah. Proses analisis dilakukan dengan pendekatan kuantitatif menggunakan parameter nilai N-SPT, jenis tanah, kedalaman muka air tanah, serta intensitas gempa dalam bentuk percepatan puncak tanah (PGA) untuk menghitung nilai Faktor Keamanan (FK) terhadap likuifaksi. Adapun kesimpulan umum dan tematik dari hasil analisis yang dilakukan sebagai berikut:

1. Pemilihan Titik Sampel yang Representatif
Reduksi jumlah titik pengujian dari delapan menjadi empat titik dilakukan berdasarkan evaluasi terhadap distribusi kerusakan pascagempa, kondisi geologi lokal, dan kedekatan dengan sistem sesar aktif. Titik-titik yang dipilih, yaitu BH-01, BH-02, BH-

03, dan BH-04, terletak pada zona-zona yang secara geologi dan seismotektonik dianggap mewakili kondisi kerentanan wilayah studi. Pemilihan ini mempertimbangkan keterbatasan sumber daya lapangan, namun tetap menjaga integritas data dan validitas analisis secara keseluruhan. Dengan demikian, keempat titik tersebut dapat memberikan gambaran yang cukup representatif terkait potensi likuifaksi di wilayah terdampak.

2. Tingkat Kerentanan terhadap Likuifaksi
Berdasarkan hasil perhitungan nilai Faktor Keamanan (FK) terhadap likuifaksi, ditemukan bahwa titik BH-03 menunjukkan potensi likuifaksi paling tinggi dibandingkan titik lainnya. Hal ini didukung oleh dominasi nilai $FK < 1$, terutama pada lapisan tanah dengan kedalaman 2 sampai 9 meter. BH-04 menyusul dengan potensi likuifaksi sedang sampai tinggi pada beberapa lapisan dangkal. BH-01 dan BH-02 umumnya menunjukkan nilai $FK > 1$, namun tetap terdapat lapisan kritis pada kedalaman tertentu yang memiliki nilai mendekati batas aman. Temuan ini menunjukkan bahwa kerentanan likuifaksi tidak seragam di seluruh titik pengujian, melainkan sangat dipengaruhi oleh karakteristik tanah setempat, termasuk tekstur tanah, derajat kejenuhan, dan kekuatan tanah yang diwakili oleh nilai N-SPT.
3. Pengaruh Parameter Seismik
Magnitudo gempa memiliki pengaruh signifikan terhadap kestabilan tanah terhadap likuifaksi. Ketika dianalisis menggunakan skenario gempa dengan magnitudo besar (misalnya $M = 8,7$), terjadi penurunan nilai FK secara drastis di hampir seluruh titik uji. Hal ini menunjukkan bahwa apabila terjadi gempa berskala besar di masa mendatang, potensi likuifaksi di wilayah studi dapat meningkat secara signifikan, bahkan pada titik-titik yang pada kondisi normal tergolong aman.
4. Peran Kondisi Geologi Lokal
Hasil analisis memperlihatkan bahwa lapisan tanah yang rentan terhadap likuifaksi

didominasi oleh material lepas seperti pasir halus, lanau berpasir, dan tanah jenuh air dengan nilai N-SPT rendah. Kondisi ini paling sering ditemukan pada lapisan permukaan hingga kedalaman 10 meter. Lapisan-lapisan ini cenderung kehilangan kekuatan geser saat mengalami guncangan gempa, menyebabkan kehilangan daya dukung tanah dan berpotensi menyebabkan kerusakan struktural.

5. Relevansi terhadap Mitigasi Bencana

Hasil analisis dari empat titik uji ini diharapkan dapat menjadi dasar awal dalam penyusunan zonasi risiko likuifaksi di wilayah terdampak. Meski jumlah titik terbatas, namun data ini sudah memberikan indikasi awal yang kuat mengenai area-area yang memerlukan perhatian khusus dalam perencanaan pembangunan infrastruktur, terutama di wilayah perkotaan seperti Palu dan sekitarnya yang terdampak parah pada peristiwa gempa pada 2018.

5.2 Rekomendasi

Berdasarkan hasil analisis dan temuan dalam penelitian ini, beberapa saran yang dapat diajukan untuk pengembangan penelitian lanjutan maupun penerapan teknis di lapangan sebagai berikut:

1. Penambahan Jumlah Titik Pengujian

Meskipun empat titik telah mewakili sebagian besar karakteristik wilayah studi, namun untuk menghasilkan peta zonasi likuifaksi yang lebih akurat dan komprehensif, sangat disarankan untuk menambah jumlah titik pengujian bor dan uji SPT. Titik tambahan perlu didistribusikan secara merata di daerah dengan potensi tinggi dan menengah terhadap bahaya seismik.

2. Integrasi Metode Uji Tambahan

Penggunaan metode uji tambahan seperti *Cone Penetration Test* (CPT), uji laboratorium gradasi tanah, kadar air, dan konsolidasi sangat direkomendasikan untuk memberikan data pendukung terhadap parameter tanah yang digunakan dalam analisis likuifaksi. Selain itu, metode geofisika seperti MASW atau *Seismic Refraction* dapat membantu memetakan

profil kecepatan gelombang geser (V_s) yang juga relevan untuk penilaian likuifaksi.

3. Pemantauan Aktivitas Seismik dan Pemutakhiran Data

Wilayah Sulawesi Tengah berada dalam zona aktif seismik dan dekat dengan sistem sesar utama seperti Sesar Palu-Koro. Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan gempa secara berkelanjutan serta pemutakhiran data geoteknik secara berkala agar potensi risiko likuifaksi dapat dievaluasi dengan data terkini.

4. Implementasi Kebijakan Tata Ruang Berbasis Risiko

Pemerintah daerah diharapkan dapat menggunakan hasil studi potensi likuifaksi sebagai acuan dalam penyusunan Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) dan kebijakan pembangunan. Area-area dengan potensi likuifaksi tinggi sebaiknya dikategorikan sebagai zona larangan atau dibatasi dalam peruntukan tertentu, khususnya untuk pembangunan fasilitas vital atau hunian padat penduduk.

5. Upaya Mitigasi Teknik Sipil di Lokasi Rawan

Untuk daerah yang tetap harus dibangun meskipun berada pada zona rawan, perlu diterapkan teknologi mitigasi seperti perbaikan tanah (*soil improvement*), pemasangan drainase vertikal, atau penerapan fondasi dalam seperti tiang pancang yang menyalurkan beban ke lapisan tanah stabil. Selain itu, desain struktur bangunan harus mengacu pada standar tahan gempa terbaru yang mempertimbangkan risiko likuifaksi.

6. Sosialisasi dan Peningkatan Kapasitas Masyarakat

Peningkatan pemahaman masyarakat terhadap bahaya likuifaksi juga penting dilakukan melalui sosialisasi dan pelatihan kebencanaan. Dengan pengetahuan yang memadai, masyarakat dapat mengambil keputusan yang tepat dalam merespons potensi bahaya, termasuk dalam penataan bangunan dan penggunaan lahan.

Daftar Pustaka

- Alfaqikh, M. F., & Zayadi, R. 2022. Analisis Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data SPT Dan CPT (Studi Kasus : Binjeita, Sulawesi Utara). *Prosiding Seminar Intelektual Muda #7, Sains, Teknologi Dan Kultur Dalam Peningkatan Kualitas Hidup Dan Peradaban*, 82-87.
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. 2014. *CPT And SPT Based Liquefaction Triggering Procedures*. California: University Of California.
- CNBC Indonesia. 2022. Januari 16). *News*. Retrieved From Cnbcindonesia.Com: <https://www.cnbcindonesia.com/news/20220116070739-4-307645/Ngeri-Ada-Potensi-Gempa-M-87-Jakarta-Dalam-Bahaya>
- Hakam, A. 2020. *Analisis Praktis Potensi Likuifaksi*. Padang: Andalas Press.
- Hakam, A., Yuliet, R., Repadi, J. A., & Novasari, H. 2022. *Prosedur Standar Kesiapsiagaan Terhadap Bahaya Likuifaksi*. Padang: Andalas Press.
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. 2004. *Semi-Empirical Procedures For Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes. Proceedings Of The 11th ICSDEE & 3rd ICEGE*, 32 - 56.
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. 2008. *Soil Liquefaction During Earthquakes*. California: Earthquake Engineering Research Institute.
- Kamel, F., & Badreddine, S. 2022. *Probabilistic Liquefaction Analysis Using Standard Penetration Test. Studia Geotechnica Et Mechanica*, 162 - 174.
- Misliniyati, R., & Amrina, E. 2023. Model Spasial Potensi Kerentanan Tanah Kawasan Pesisir Kota Bengkulu terhadap Bahaya Likuifaksi. *Fropil Vol. 11 No.1*, 29-38.
- Seed, H. B., & Idriss, A. M. 1971. *Simplified Procedure For Evaluating Soil Liquefaction Potential. Journal Of The Soil Mechanics And Foundations Division* 97(9), 1249 - 1273.
- Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., & Chung, R. M. 1985. *The Influence Of SPT Procedures In Soil Liquefaction Resistance Evaluation. J. Geotech. Engrg., ASCE*, 111(12), 1425 - 1445.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. 1996. *Soil Mechanics In Engineering Practice*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Tijow, K. C., Sompie, O. B., & Ticoh, J. H. 2018. Analisis Potensi Likuifaksi Tanah Berdasarkan Data Standart Penetration Test (SPT), Studi kasus : Dermaga Bitung, Sulawesi Utara. *Jurnal Sipil Statik Vol. 6 No.7*, 491-500.
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., . . . Stokoe II, K. H. 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*, 817 - 833.