

STUDI POTENSI LIKUIFAKSI DENGAN PENDEKATAN *CYCLIC RESISTANCE RATIO* DAN *CYCLIC STRESS RATIO* DI SEMPADAN DANAU TOBA

Boysa Banjarnahor¹, Tika Ermita Wulandari^{2*}

^{1,2}Program Studi Teknik Sipil Universitas Medan Area, tikaermita@staff.uma.ac.id

ABSTRAK

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat aktivitas seismik tertinggi di dunia karena berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik aktif, yaitu Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Kondisi ini menimbulkan potensi bencana gempa bumi yang dapat memicu fenomena likuifaksi, yaitu hilangnya kekuatan geser tanah jenuh akibat peningkatan tekanan air pori. Kawasan sempadan Danau Toba di Sumatera Utara, yang terbentuk dari aktivitas tekto-vulkanik supervolcano, termasuk wilayah rawan likuifaksi karena berada di zona seismik aktif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi likuifaksi di sekitar Danau Toba dengan menggunakan data Standard Penetration Test (SPT) pada beberapa kedalaman tanah, serta variasi skenario gempa 6, 7, dan 7,5 skala Richter. Analisis dilakukan dengan menghitung parameter-parameter penting seperti tegangan vertikal total (σ_v), tekanan air pori (μ), tegangan efektif (σ'_v), Cyclic Stress Ratio (CSR), Cyclic Resistance Ratio (CRR), serta faktor keamanan (FS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan tanah pada kedalaman 6,45 m memiliki $FS < 1$ untuk semua skenario gempa, sehingga berpotensi mengalami likuifaksi. Lapisan pada kedalaman 8,45 m mendekati kondisi kritis pada gempa 7,5 SR dengan $FS \approx 1,02$. Sebaliknya, lapisan tanah dangkal (2,45–4,45 m) dan lapisan dalam ($\geq 12,45$ m) relatif aman dengan $FS > 1,5$. Rekomendasi perbaikan meliputi metode preloading, PVD, vibro-compaction, atau grouting pada lapisan rentan, serta penggunaan pondasi dalam untuk meningkatkan stabilitas struktur. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar perencanaan teknis pembangunan di kawasan sempadan Danau Toba.

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

Penerbit : Fakultas Teknik Universitas Pasifik Morotai

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik aktif, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik. Kondisi ini menyebabkan Indonesia memiliki tingkat aktivitas seismik yang tinggi, sehingga rawan terhadap berbagai bencana alam, salah satunya adalah likuefaksi. Likuefaksi adalah suatu fenomena geoteknik di mana tanah jenuh kehilangan kekuatan geser secara tiba-tiba akibat peningkatan tekanan air pori, biasanya dipicu oleh gempa bumi. Tanah yang mengalami likuefaksi akan berperilaku seperti fluida, sehingga sangat berbahaya bagi bangunan atau struktur yang berdiri di atasnya [1].

Salah satu wilayah yang memiliki potensi terhadap likuefaksi adalah kawasan sempadan Danau Toba, Sumatera Utara. Danau Toba sendiri merupakan danau tekto-vulkanik yang terbentuk dari letusan supervolcano ribuan tahun lalu dan masih berada dalam zona seismik aktif [2]. Proyek-proyek pembangunan yang dilakukan di

sekitar sempadan danau, baik berupa infrastruktur maupun kawasan wisata, perlu mempertimbangkan risiko likuefaksi untuk menjamin keselamatan dan keberlanjutan bangunan [3].

Untuk mengidentifikasi dan menganalisis potensi likuefaksi di suatu lokasi, salah satu metode yang umum digunakan adalah berdasarkan data *Standard Penetration Test* (SPT). Nilai SPT memberikan informasi tentang kepadatan dan konsistensi tanah pada berbagai kedalaman, yang sangat penting dalam evaluasi kerentanan tanah terhadap likuefaksi.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi likuefaksi pada lokasi proyek di sempadan Danau Toba dengan menggunakan data SPT dengan variasi kekuatan gempa yaitu 6, 7 dan 7,5 skala ritter. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pertimbangan teknis dalam perencanaan pondasi dan struktur bangunan agar mampu menghadapi risiko gempa dan likuefaksi secara efektif.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Likuifaksi

Likuifaksi didefinisikan sebagai transformasi material granular dari bentuk solid menjadi cair sebagai akibat dari naiknya tekanan air pori dan kehilangan tegangan efektif (Sjahrain, dkk., 2021). Istilah likuefaksi di Indonesia mulai dikenal luas oleh masyarakat setelah terjadinya gempa dahsyat di Provinsi Sulawesi Tengah pada 28 September 2018. Menurut laporan BBC Indonesia (2018), gempa berkekuatan magnitudo 7,4 dengan pusat gempa sekitar 26 km di utara Donggala dan 80 km barat laut Kota Palu ini menyebabkan korban jiwa lebih dari 2.045 orang. Lebih dari setengah korban tersebut disebabkan oleh kerusakan tanah akibat fenomena likuefaksi [4].

Sebelum terjadi gempa bumi, tekanan air dalam tanah umumnya berada pada tingkat yang relatif rendah. Namun, ketika tanah mengalami getaran, tekanan air pori meningkat, sehingga partikel-partikel tanah menjadi lebih mudah bergerak. Ketika partikel tanah terdispersi oleh air, kekuatan geser dan daya dukung tanah hilang, sehingga kemampuan menahan beban hanya bergantung pada tekanan air pori. Dalam kondisi ini, tanah berubah menjadi seperti cairan dan kehilangan kestabilannya, menyebabkan beban di atas tanah, seperti struktur bangunan, dapat tenggelam. Sebaliknya, tangki-tangki yang tertanam di dalam tanah justru terdorong ke atas dan muncul ke permukaan [1].

2.2. Kondisi Terjadinya Likuifaksi

Likuifaksi hanya dapat terjadi jika tanah memenuhi kondisi tertentu. Apabila kondisi tersebut tidak terpenuhi, maka tanah tersebut tidak memiliki potensi mengalami likuifaksi. Oleh karena itu, dalam perencanaan pembangunan, perlu dihindari penggunaan lahan yang memiliki karakteristik tanah rentan likuifaksi. Fenomena ini umumnya terjadi pada tanah yang longgar atau tidak padat, seperti tanah berpasir, endapan delta sungai, atau material lepas lainnya. Jenis tanah tersebut cenderung memiliki banyak rongga, sehingga mudah mengalami perubahan struktur saat menerima getaran [5].

Secara umum, syarat terjadinya likuifaksi di suatu wilayah meliputi:

1. Lapisan tanah berjenis pasir atau lanau,
2. Lapisan tanah jenuh air,
3. Tanah dalam kondisi lepas atau tidak padat,
4. Terjadi gempa dengan magnitudo lebih dari 5 skala ritter.
5. Percepatan gempa lebih besar dari 0,1 g.

2.3. Perhitungan Parameter Tanah

Beberapa parameter penting dihitung dalam tahap ini, di antaranya:

1. Tegangan vertikal total (σ_v), tegangan air pori (μ), dan tegangan vertikal efektif (σ'_v).
2. Nilai N-SPT dikoreksi menjadi (N1)60 dan kemudian menjadi (N1)60cs dengan memperhitungkan faktor koreksi alat dan fines content.
3. Penentuan nilai berat isi tanah (γ) dengan interpolasi berdasarkan jenis tanah dan nilai N-SPT.

2.4. Perhitungan Faktor Analisis

Dilakukan perhitungan terhadap parameter-parameter berikut:

- 1 *Stress Reduction Factor* (rd) sesuai kedalaman dan magnitudo gempa.
- 2 *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dengan rumus:

$$CSR = 0,65 \cdot \frac{\alpha_{Max}}{g} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot rd$$

CSR = Tegangan siklik yang menyebabkan likuifaksi

α_{max} = Percepatan gempa dasar

g = Percepatan gravitasi bumi = 9.81

σ'_v = Tegangan vertikal efektif tanah (kN/m²)

σ_v = Tegangan vertikal total tanah (kN/m²)

rd = Faktor reduksi terhadap tegangan

- 3 *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) menggunakan data (N1)60cs dan persamaan dari Seed & Idriss dengan koreksi MSF dan faktor overburden ($K\sigma$).

$$CRR_{Mw} = CRR_{7,5} \cdot K\sigma \cdot MSF$$

$$CRR_{7,5} = \exp \left\{ \left[\frac{(N1)60sc}{14,1} \right] + \left[\frac{(N1)60sc}{126} \right]^2 - \left[\frac{(N1)60sc}{23,6} \right]^3 + \left[\frac{(N1)60sc}{25,4} \right]^4 - 2,8 \right\}$$

MSF = Magnitude scaling factors

Mw = Magnitudo gempa

$K\sigma$ = Faktor koreksi overburden

- 4 *Magnitude Scaling Factor* (MSF) berdasarkan magnitudo gempa yang dianalisis.

$$MSF = 6,9 \cdot \exp(-Mw/4) - 0,058 \leq 1,8$$

$$K\sigma = \left(\frac{\sigma_v}{p_a} \right)^f$$

$$f = 0,831 - \frac{(N1)60sc}{160}$$

σ_v = Tegangan vertikal total tanah (kN/m²)

- pa = Tegangan atmosfer 100 kPa (1 atm)
- f = Faktor kerapatan relatif tanah
- (N1)_{60cs} = Nilai SPT yang dikoreksi terhadap pengaruh fines content

2.5. Analisis Faktor Keamanan (FS)

Potensi likuifaksi dianalisis dengan menghitung *Factor of Safety* (FS) terhadap likuifaksi, yaitu:

$$FS = \frac{CRR}{CSR}$$

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

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

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

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan pendekatan analisis potensi likuifaksi berdasarkan data lapangan dari Standard Penetration Test (SPT) serta parameter fisik tanah. Data yang dianalisis meliputi:

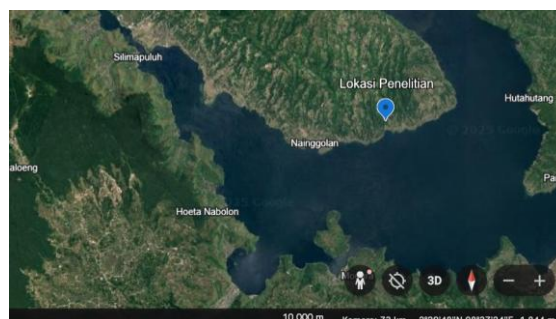
1. Data primer: hasil pengujian lapangan SPT (nilai N-SPT), kedalaman lapisan tanah, serta data kadar butiran halus (*fines content/FC*).
2. Data sekunder: peta seismisitas, nilai percepatan gempa maksimum (α_{max}) yang diperoleh dari Aplikasi Spektrum Respons Desain Indonesia 2021, serta referensi literatur terkait parameter tanah.

Tahapan penelitian dilakukan melalui:

1. Pengumpulan data SPT dan parameter fisik tanah.
2. Analisis data laboratorium untuk memperoleh nilai FC.
3. Perhitungan CSR, CRR, dan FS pada setiap lapisan tanah.
4. Evaluasi potensi likuifaksi dan penyusunan rekomendasi.

3.2 Lokasi Penelitian

Lokasi Penelitian berada di kawasan Sempadan Danau Toba, tepatnya di sekitar daerah Nainggolan, Kabupaten Samosir, Sumatera Utara. Peta ini menunjukkan posisi koordinat lokasi 2°29'48" N, 98°37'24" E.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

3.3 Kondisi Tanah

Kondisi Tanah pada lokasi penelitian di dominasi dengan pasir, data SPT seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Data NSPT

z (m)	NSPT	Deskripsi Tanah
2.45	12	Pasir Bercampur Batu Apung
4.45	10	Pasir Sedang Halus
6.45	3	Pasir Sedikit Lempung
8.45	4	Pasir Sedang Halus
10.45	5	Pasir Sedang Halus
12.45	20	Pasir Sedang
14.45	52	Pasir Sedang Halus
16.45	52	Pasir Sedang Halus

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, diperoleh hasil tegangan efektif tanah yang merupakan salah satu parameter penting dalam mekanika tanah. Tegangan efektif menggambarkan besarnya tegangan yang benar-benar dipikul oleh kerangka butiran tanah setelah dikurangi pengaruh tekanan air pori dari tegangan total. Dalam studi likuifaksi, penurunan tegangan efektif akibat kenaikan tekanan air pori selama gempa menjadi penyebab utama hilangnya kekuatan geser pada lapisan pasir jenuh. Oleh karena itu, evaluasi tegangan efektif menjadi langkah kunci dalam analisis. Hasil analisis tegangan efektif tanah dapat dilihat pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Tegangan Efektif Tanah

z (m)	γ (kN/m ³)	σ_v (kN/m ²)	μ (kN/m ²)	σ'_v (kN/m ²)
2.45	21.03	51.51	0	51.51
4.45	23.43	104.26	43.65	60.6
6.45	11.39	73.46	63.27	10.19
8.45	15.35	129.71	82.89	46.81
10.45	15.1	157.8	102.51	55.28
12.45	18.75	233.44	122.13	111.31
14.45	20.88	301.77	141.75	160.02
16.45	20.88	343.54	161.37	182.17

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, diperoleh hasil tegangan efektif tanah yang merupakan salah satu parameter penting dalam mekanika tanah. Tegangan efektif menggambarkan besarnya tegangan yang benar-benar dipikul oleh kerangka butiran tanah setelah dikurangi pengaruh tekanan air pori dari tegangan total. Dalam studi likuifaksi, penurunan tegangan efektif akibat kenaikan tekanan air pori selama gempa menjadi penyebab utama hilangnya kekuatan geser pada lapisan pasir jenuh. Oleh karena itu, evaluasi tegangan efektif menjadi langkah kunci dalam analisis. Hasil analisis tegangan efektif tanah dapat dilihat pada Tabel 2 berikut:

Setelah dilakukan analisis data hasil pengujian laboratorium, yang meliputi perhitungan tegangan vertikal total, tekanan air pori, dan tegangan vertikal efektif, tahap selanjutnya adalah melakukan koreksi nilai N-SPT agar parameter tanah yang dihasilkan lebih akurat. Tabel 3 menampilkan nilai faktor koreksi CN, CE, CB, CR, dan CS yang digunakan untuk menyesuaikan hasil uji penetrasi standar (SPT) menjadi (N1)60. Selain itu, juga disajikan faktor α dan β yang berperan dalam perhitungan (N1)60cs. Data ini sangat penting dalam evaluasi

potensi likuifaksi di setiap lapisan tanah, karena (N1)60cs menggambarkan kemampuan tanah dalam menahan beban siklik akibat gempa. Perhitungan CSR mempertimbangkan beberapa parameter kunci, seperti kedalaman (z), nilai N-SPT, faktor reduksi tegangan (rd), percepatan gempa maksimum (α_{max}), percepatan gravitasi (g), tegangan vertikal total (σ_v), serta tegangan vertikal efektif (σ'_v).

Tabel 3. Perhitungan CSR

z (m)	CN	CE	CB	CR	CS	(N1)60	A	β	(N1)60cs	rd	α_{max}	CSR
2.45	1.28	0.8	1.15	0.75	1	10.621	3.615	0.901	13.179	0.981	0.559	0.036
4.45	1.22	0.8	1.15	0.75	1	8.405	3.615	0.901	11.184	0.966	0.559	0.062
6.45	1.69	0.8	1.15	0.75	1	3.498	3.615	0.901	6.765	0.951	0.559	0.254
8.45	1.32	0.8	1.15	0.75	1	3.640	3.615	0.901	6.893	0.935	0.559	0.096
10.45	1.26	0.8	1.15	0.75	1	4.330	3.615	0.901	7.514	0.895	0.559	0.095
12.45	0.95	0.8	1.15	0.75	1	13.125	3.615	0.901	15.435	0.842	0.559	0.065
14.45	0.79	0.8	1.15	0.75	1	28.190	3.615	0.901	29.001	0.788	0.559	0.055
16.45	0.73	0.8	1.15	0.75	1	26.123	3.615	0.901	27.140	0.735	0.559	0.051

Tabel 4. berikut menampilkan nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) pada berbagai kedalaman tanah (z) yang telah disesuaikan untuk beberapa tingkat magnitudo gempa, yaitu CRR6, CRR7, dan CRR7,5. Nilai-nilai tersebut menunjukkan kemampuan lapisan tanah dalam menahan beban siklik akibat gempa dengan magnitudo yang berbeda.

Tabel 4. Perhitungan CRR

z (m)	CRR6	CRR7	CRR7,5
2.45	0.08	0.06	0.14
4.45	0.15	0.11	0.13
6.45	0.08	0.06	0.10
8.45	0.15	0.11	0.10
10.45	0.19	0.14	0.10
12.45	0.41	0.31	0.16
14.45	1.25	0.96	0.43
16.45	1.18	0.91	0.35

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan maka didapat safety factor untuk setiap kedalaman berdasarkan kekuatan gempa 6 SR, 7 SR dan 7,5 SR dapat terlihat pada tabel 5 dibawah ini :

Tabel 5. Safety Factor

z (m)	FS6	FS7	FS7,5
2.45	2.22	1.71	3.89
4.45	2.42	1.86	2.06
6.45	0.33	0.25	0.38
8.45	1.54	1.18	1.02
10.45	1.97	1.51	1.07
12.45	6.21	4.78	2.45
14.45	22.64	17.43	7.79
16.45	23.04	17.75	6.85

Berdasarkan analisis yang didapat maka ditarik hasil bahwa :

1. Lapisan tanah pada lokasi penelitian didominasi oleh pasir dengan variasi kepadatan pada setiap kedalaman. Hasil perhitungan tegangan vertikal total (σ_v), tekanan air pori (μ), dan tegangan efektif (σ'_v) menunjukkan bahwa lapisan tanah pada kedalaman menengah (6,45–10,45 m) memiliki tegangan efektif yang lebih rendah, sehingga lebih rentan terhadap likuifaksi.
2. Hasil perhitungan Cyclic Stress Ratio (CSR) dan Cyclic Resistance Ratio (CRR) menunjukkan bahwa lapisan tanah pada kedalaman 6,45 m memiliki nilai FS < 1 untuk semua skenario gempa (6 SR, 7 SR, dan 7,5 SR), yang berarti lapisan ini berpotensi mengalami likuifaksi.
3. Sementara itu, lapisan pada kedalaman 8,45 m berada pada kondisi kritis untuk gempa dengan magnitudo 7,5 (FS \approx 1,02), meskipun masih aman untuk gempa dengan magnitudo lebih rendah (6 SR dan 7 SR).
4. Lapisan tanah dangkal (2,45–4,45 m) relatif stabil dengan FS > 1,5 pada semua skenario gempa. Lapisan tanah dalam (\geq 12,45 m) memiliki nilai FS yang sangat tinggi (FS > 6), menunjukkan ketahanan yang signifikan terhadap beban siklik akibat gempa. Pada kedalaman 6,45 m berpotensi terjadi likuifaksi pada semua kekuatan gempa dikarenakan FS < 1 sedangkan pada kedalaman 8,45 m pada FS6 didapat hasil 1,54 dan FS7 = 1,18 (aman), tetapi FS7,5 = 1,02 mendekati kondisi kritis. Ini menunjukkan bahwa untuk gempa dengan magnitudo 7,5, lapisan ini hampir mencapai ambang likuifaksi.
5. Analisis Tren Terhadap Kedalaman yaitu lapisan tanah paling rentan likuifaksi berada di kedalaman 6,45 m dengan FS < 0,4 untuk semua magnitudo. Kedalaman dangkal (2,45–4,45 m) cukup stabil karena memiliki FS > 1,5. Sedangkan pada lapisan dalam (\geq 12,45 m) memiliki FS yang sangat besar, menandakan ketahanan tinggi terhadap beban siklik akibat gempa.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang didapat maka didapatkan kesimpulan bahwa lapisan yang mengalami likuifaksi pada kedalaman kedalaman 6.45 dengan kekuatan gempa 6, 7 dan 7,5 skala ritter. Sedangkan kedalaman 8,45 m pada FS6 didapat hasil 1,54 dan FS7 = 1,18 (aman), tetapi FS7,5 = 1,02 mendekati kondisi kritis dan untuk kedalaman yang lainnya aman terhadap potensi likuifaksi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hutagalung, R., & Tarigan, J. (2019). Analisis Potensi Likuifaksi Menggunakan Metode Seed dan Idriss. *Jurnal Teknik Sipil*, 6(2), 75–84.
- [2] BMKG (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika). (2020). *Kondisi Seismotektonik Indonesia*. Jakarta: BMKG.
- [3] Hafidzsyah, R., dkk. (2023). Soil Settlement Risk From Liquefaction At Lake Toba Tourism Infrastructure, North Sumatera, Indonesia. *International Journal of GEOMATE*, Nov., 2023 Vol.25, Issue 111, pp.122-129.
- [4] Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute.
- [5] Mina, E., dkk. (2018). *Analisa Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data SPT (Studi Kasus proyek Pembangunan Gedung Baru Untirta Sindang Sari)*.
- [6] Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1982). *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes*. Berkeley: Earthquake Engineering Research Institute (EERI).