

Artikel Penelitian (Teknik Sipil)

Analisis Sensitivitas Potensi Likuifaksi pada Lapisan Pasir Jenuh Air Akibat Variasi Magnitudo Momen (M_w) Menggunakan Data *Standard Penetration Test* (SPT)

M. Rizky, Tika Ermita Wulandari *

Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Medan Area, Kota Medan, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 20 April 2026
Revisi Akhir: 17 Juli 2026
Diterbitkan Online: 20 Juli 2026

KATA KUNCI

Likuifaksi
Magnitudo Momen
Lapisan Pasir Jenuh Air
Faktor Keamanan
SPT

KORESPONDENSI (*)

E-mail: tikaermita@staff.uma.ac.id

A B S T R A K

Fenomena likuifaksi merupakan ancaman serius bagi infrastruktur di wilayah dengan karakteristik tanah pasiran jenuh air, termasuk Kota Medan yang didominasi endapan aluvium muda. Masalah utama dalam mitigasi bencana di wilayah ini adalah keterbatasan analisis yang seringkali terpaku pada satu nilai magnitudo gempa rencana. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi sensitivitas potensi likuifaksi pada lapisan pasir jenuh air melalui simulasi variasi Magnitudo Momen (M_w) mulai dari skala 5,0 hingga 7,5. Metodologi yang digunakan adalah kuantitatif deskriptif berbasis data *Standard Penetration Test* (SPT) dengan prosedur Idriss dan Boulanger. Analisis dilakukan dengan membandingkan beban seismic/*Cyclic Stress Ratio* (CSR) terhadap ketahanan tanah/*Cyclic Resistance Ratio* (CRR) untuk menentukan Faktor Keamanan (FS). Hasil penelitian menunjukkan adanya lapisan kritis pada kedalaman 10,45 meter dengan nilai penetrasi terstandar (N_{160cs}) sebesar 7,89. Pada lapisan ini, kenaikan magnitudo gempa menyebabkan penurunan signifikan nilai FS, di mana pada gempa 6,0 SR tanah mulai mengalami kegagalan dengan nilai FS sebesar 0,89, dan terus merosot hingga 0,64 pada skenario 7,5 SR. Sebaliknya, stabilitas masif ditemukan pada kedalaman di atas 20,45 meter dengan nilai FS yang tetap terjaga di atas ambang batas aman ($> 1,1$). Sebagai solusi teknis, disarankan penempatan ujung fondasi tiang di bawah kedalaman 22 meter atau melakukan perbaikan tanah pada zona kritis untuk meminimalisir risiko kegagalan struktur akibat likuifaksi.

PENDAHULUAN

Indonesia secara tektonik terletak pada pertemuan tiga lempeng utama dunia, yaitu lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik, yang menjadikannya salah satu wilayah dengan aktivitas seismik paling tinggi di dunia [1]. Salah satu dampak sekunder yang paling merusak akibat guncangan gempa bumi pada lapisan tanah non-kohefif yang jenuh air adalah fenomena likuifaksi [2]. Likuifaksi terjadi ketika tekanan air pori meningkat secara drastis akibat beban siklik, yang mengakibatkan hilangnya tegangan efektif dan kekuatan geser tanah secara tiba-tiba, sehingga tanah berperilaku menyerupai cairan [3, 4].

Kota Medan, sebagai salah satu pusat pertumbuhan ekonomi di Pulau Sumatera, memiliki karakteristik geologi yang didominasi oleh endapan aluvium muda dengan kondisi muka air tanah yang relatif dangkal [5]. Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa wilayah dengan karakteristik tanah pasiran lepas jenuh air di Medan memiliki potensi kerentanan terhadap likuifaksi [6, 7]. Namun, sebagian besar studi tersebut umumnya terpaku pada satu nilai magnitudo gempa rencana tertentu, sehingga respons dinamis lapisan tanah terhadap variasi skala kekuatan gempa belum terpetakan secara komprehensif.

Kekuatan gempa yang direpresentasikan melalui Magnitudo Momen (M_w) memiliki korelasi langsung terhadap durasi guncangan dan jumlah siklus beban yang diterima oleh tanah [8, 9]. Perubahan nilai M_w akan secara signifikan memengaruhi nilai *Magnitude Scaling Factor* (MSF) dalam perhitungan ketahanan tanah terhadap likuifaksi (*Cyclic Resistance Ratio*). Oleh karena itu, diperlukan sebuah analisis sensitivitas untuk memahami sejauh mana pergeseran nilai faktor keamanan tanah pada kedalaman tertentu apabila terjadi variasi kekuatan gempa dari skala menengah hingga besar.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi sensitivitas potensi likuifaksi pada lapisan pasir jenuh air di salah satu titik strategis di wilayah Medan dengan menggunakan data *Standard Penetration Test* (SPT). Analisis dilakukan dengan mensimulasikan berbagai skenario magnitudo momen (M_w) untuk mengidentifikasi ambang batas kritis lapisan tanah dalam menahan beban seismik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih dinamis bagi perencanaan infrastruktur tahan gempa, khususnya dalam menentukan kedalaman fondasi yang aman terhadap risiko likuifaksi pada berbagai potensi magnitudo gempa di masa depan.

TINJAUAN PUSTAKA

Fenomena Likuifaksi

Likuifaksi didefinisikan sebagai transformasi material berbutir dari kondisi padat (*solid*) menjadi cair (*liquid*) sebagai akibat dari peningkatan tekanan air pori dan berkurangnya tegangan efektif. Secara fisis, likuifaksi dipicu oleh akumulasi tekanan air pori berlebih (*excess pore water pressure ratio*) yang timbul akibat beban siklik gempa bumi. Ketika tekanan air pori meningkat drastis hingga menyamai tekanan overburden efektif (atau tekanan total), tanah kehilangan seluruh kekuatan gesernya sehingga tegangan efektif tanah menjadi nol [10]. Kondisi ini mengakibatkan penurunan kapasitas dukung aksial pada fondasi secara signifikan, yang dapat menyebabkan kegagalan struktur bangunan di atasnya seperti penurunan cepat (*quick settlement*), fondasi menjadi miring (*tilting*), atau penurunan sebagian (*differential settlement*) [11].

Evaluasi Ketahanan Tanah Berbasis Data SPT

Penggunaan *Standard Penetration Test* (SPT) merupakan metode yang sangat reliabel untuk mengevaluasi ketahanan tanah terhadap beban gempa karena mampu memberikan korelasi langsung dengan kepadatan relatif tanah pasir. Nilai perlawanan penetrasi (N-SPT) yang didapat dari lapangan harus dikoreksi terhadap berbagai faktor teknis, termasuk energi alat dan tekanan vertikal efektif, untuk mendapatkan nilai $(N_1)_{60}$ yang terstandar. Data SPT ini menjadi basis utama dalam menentukan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) yang merepresentasikan kemampuan tanah menahan guncangan.

Karakteristik Tanah dan Muka Air Tanah di Kota Medan

Potensi likuifaksi sangat dipengaruhi oleh jenis tanah dan keberadaan air. Tanah yang paling rentan adalah pasir halus atau pasir berlanau dengan kepadatan rendah (*loose sand*) dan memiliki nilai perlawanan penetrasi (N-SPT) yang rendah. Di wilayah Medan, khususnya kawasan pesisir Belawan, kondisi geologi didominasi oleh tanah pasiran yang jenuh air dengan posisi muka air tanah yang sangat dangkal (0,8 m hingga 4 m), yang menjadikannya zona sangat rawan terhadap kegagalan tanah saat gempa. Data teknis pada proyek-proyek di pusat kota Medan menunjukkan nilai N-SPT yang berkisar antara 4 hingga 11 pada kedalaman dangkal, yang mengonfirmasi adanya lapisan kritis yang berisiko tinggi.

Prosedur Evaluasi Simplified Procedure

Analisis potensi likuifaksi umumnya menggunakan *simplified procedure* yang pertama kali diperkenalkan oleh Seed dan Idriss. Metode ini mengevaluasi keamanan tanah dengan membandingkan dua parameter utama: *Cyclic Stress Ratio* (CSR) sebagai representasi beban gempa, dan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) sebagai representasi ketahanan tanah terhadap beban tersebut [12].

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

- CSR = Tegangan siklik yang menyebabkan likuifaksi
- α_{max} = Percepatan gempa dasar
- g = Percepatan gravitasi bumi = 9.81
- σ'_v = Tegangan vertikal efektif tanah (kN/m^2)

σ_v = Tegangan vertikal total tanah (kN/m²)

r_d = Faktor reduksi terhadap tegangan

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

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

MSF = Magnitude scaling factors

M_w = Magnitudo gempa

K_{σ} = Faktor koreksi overburden

Metode Idriss dan Boulanger (2010)

Prosedur Idriss-Boulanger merupakan pemutakhiran standar internasional yang menekankan pada penggunaan nilai (N1)_{60cs}. Nilai ini adalah hasil koreksi nilai N-SPT lapangan terhadap energi alat (60%), tekanan vertikal efektif (*overburden stress*), serta penyesuaian terhadap kadar lumpur (*finest content*) agar setara dengan kondisi pasir bersih (*clean sand equivalent*). Prosedur ini memberikan hasil yang lebih presisi dalam menentukan ambang batas pemicu likuifaksi dibandingkan metode konvensional.

Pengaruh Magnitudo Gempa dan MSF

Magnitudo momen gempa (M_w) sangat menentukan jumlah siklus beban yang diterima tanah. Untuk menyesuaikan nilai CRR dari magnitudo standar 7,5 ke magnitudo rencana, digunakan *Magnitude Scaling Factor* (MSF). Analisis sensitivitas dengan memvariasikan magnitudo (seperti skala 5,0 hingga 8,5 M_w) sangat krusial dilakukan karena setiap kenaikan magnitudo akan menurunkan nilai faktor keamanan tanah secara signifikan, meningkatkan risiko kejadian likuifaksi di permukaan.

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

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

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

σ_v = Tegangan vertikal total tanah (kN/m²)

p_a = Tegangan atmosfer 100 kPa (1 atm)

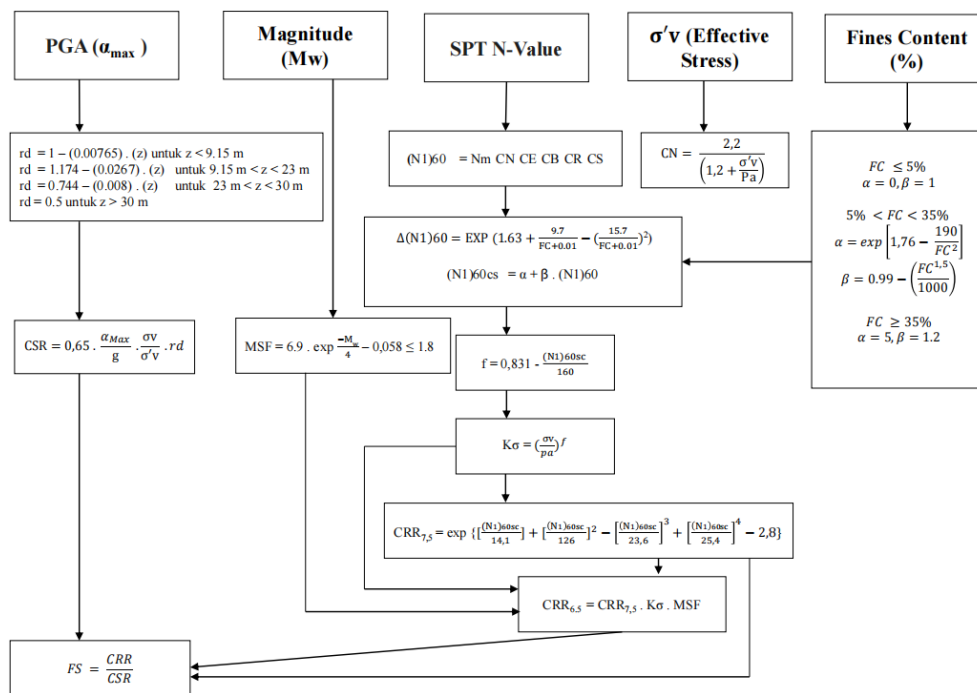
f = Faktor kerapatan relatif tanah

(N1)_{60cs} = Nilai SPT yang dikoreksi terhadap pengaruh *finest content*

Faktor Keamanan (Factor of Safety)

Tingkat kerentanan suatu lapisan tanah dinyatakan melalui Faktor Keamanan (FS), yang merupakan rasio antara CRR dan CSR. Secara teknis, jika nilai FS < 1,0, tanah diprediksi akan mengalami likuifaksi, sedangkan nilai FS > 1,0 menunjukkan kondisi aman. Penggunaan indeks potensi likuifaksi (*Liquefaction Potential Index* - LPI) juga sering diterapkan untuk memetakan tingkat keparahan dampak likuifaksi di suatu wilayah berdasarkan nilai FS pada setiap kedalaman lapisan tanah.

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



Gambar 1. Perhitungan potensi likuifaksi

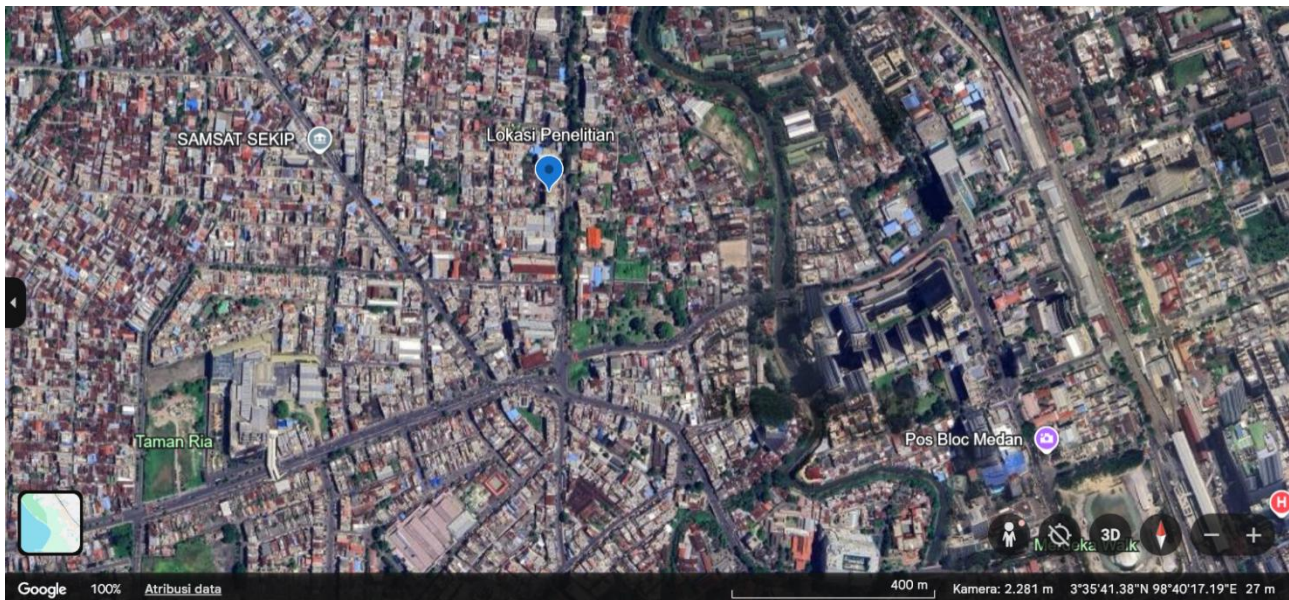
METODOLOGI

Metodologi penelitian ini dilakukan secara kuantitatif deskriptif dengan menganalisis sensitivitas tanah terhadap likuifaksi pada berbagai skenario magnitudo gempa (M_w). Tahapan penelitian meliputi pengumpulan data sekunder *Standard Penetration Test* (SPT), perhitungan parameter tegangan tanah, koreksi nilai SPT, serta penentuan faktor keamanan (FS).

Pengumpulan Data dan Lokasi Studi

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder hasil pengujian SPT dari lokasi strategis di Kota Medan. Parameter utama yang diambil meliputi kedalaman lapisan tanah, nilai perlawanan penetrasi (N-SPT), kadar lumpur (*finer content*), dan kedalaman muka air tanah (MAT).

Penelitian ini difokuskan pada wilayah administratif Kota Medan, Provinsi Sumatera Utara. Secara astronomis, lokasi pusat penelitian atau titik tinjauan utama (BH-1) berada pada koordinat $3^\circ 35' 41.38''$ LU dan $98^\circ 40' 17.19''$ BT. Penentuan lokasi ini sangat strategis karena berada di kawasan yang memiliki dinamika pembangunan infrastruktur yang sangat tinggi dan mewakili karakteristik geologi endapan aluvium muda yang mendominasi dataran rendah Kota Medan. Lokasi penelitian dapat terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Lokasi Penelitian

Karakteristik Profil Tanah pada Titik BH-1

Berdasarkan hasil pengeboran dan pengujian lapangan pada titik BH-1, ditemukan profil stratigrafi tanah yang bervariasi dengan dominasi material non-kohefif hingga kedalaman 30,45 meter. Pada lapisan permukaan hingga kedalaman 2,45 meter, tanah didominasi oleh material pasir sedang dengan nilai N-SPT sebesar 6 yang menunjukkan konsistensi lepas (loose). Memasuki kedalaman kritis antara 8,45 hingga 14,45 meter, profil tanah kembali menunjukkan dominasi material berupa pasir halus lempung berlanau dengan nilai N-SPT yang sangat rendah, bahkan mencapai nilai minimum sebesar 2 pada kedalaman 10,45 meter. Karakteristik lapisan pasir jenuh air dengan nilai N-SPT < 15 pada titik ini menjadi parameter utama dalam simulasi sensitivitas terhadap berbagai variasi magnitudo gempa. Visualisasi profil tanah eksisting tersebut disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Lapisan Tanah Eksisting

Kedalaman (m)	NSPT	Deskripsi Tanah
2.45	6	Pasir Sengah
4.45	14	Lempung Sedikit Lanau
6.45	24	Lempung Sedikit Lanau
8.45	8	Pasir Halus Lempung Berlanau
10.45	2	Pasir Halus Lempung Berlanau
12.45	14	Pasir Halus Lempung Berlanau
14.45	4	Pasir Halus Lempung Berlanau
16.45	5	Pasir Berlanau
18.45	11	Pasir Berlanau
20.45	27	Pasir Berlanau
22.45	59	Pasir Berlanau
24.45	60	Pasir Berlanau
26.45	57	Pasir Berlanau
28.45	58	Pasir Berlanau
30.45	60	Pasir Berlanau

Alur Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui serangkaian tahapan sistematis untuk mengevaluasi sensitivitas tanah terhadap potensi likuifaksi di wilayah Medan. Alur penelitian dimulai dengan pengumpulan data sekunder berupa log bor *Standard Penetration Test* (SPT) dari beberapa titik tinjauan yang mencakup data profil tanah, nilai N-SPT lapangan, kadar lumpur (*finer content*), dan posisi muka air tanah. Setelah data terkumpul, tahap selanjutnya adalah melakukan analisis tegangan tanah dengan menghitung tegangan vertikal total (σ_v) dan tegangan vertikal efektif (σ'_v) pada setiap interval kedalaman

lapisan tanah. Tahapan krusial berikutnya adalah melakukan koreksi terhadap nilai N-SPT lapangan menggunakan prosedur Idriss dan Boulanger (2010), yang meliputi koreksi energi alat, diameter lubang bor, hingga koreksi tekanan overburden guna mendapatkan nilai perlawanan tanah yang terstandar.

Proses dilanjutkan dengan pemodelan beban gempa melalui perhitungan *Cyclic Stress Ratio* (CSR) berdasarkan nilai percepatan tanah maksimum (α_{max}) yang direncanakan. Bersamaan dengan itu, dihitung pula nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) sebagai representasi ketahanan tanah yang kemudian disesuaikan dengan variasi *Magnitude Momen* (Mw) antara 5,0 hingga 8,5 menggunakan *Magnitude Scaling Factor* (MSF).

Pada tahap akhir, dilakukan penentuan Faktor Keamanan (FS) dengan membandingkan nilai CRR dan CSR untuk setiap skenario magnitudo. Hasil analisis kemudian diinterpretasikan untuk mengetahui ambang batas kedalaman dan kekuatan gempa yang memicu likuifaksi, sehingga dapat ditarik kesimpulan mengenai tingkat sensitivitas tanah di wilayah Medan sebagai bagian dari upaya mitigasi bencana.

HASIL DAN PEMBAHASAN

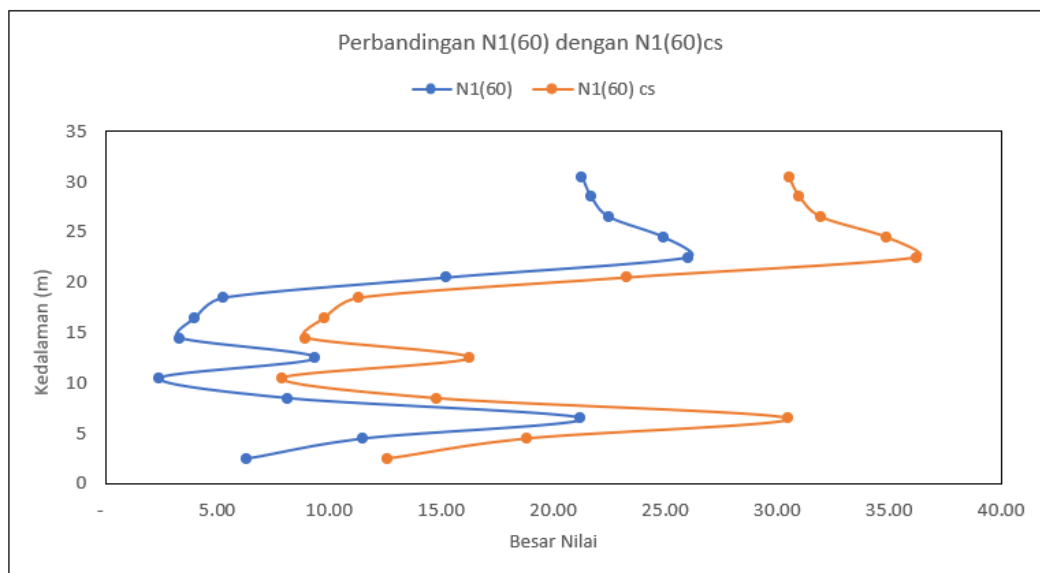
Analisis Perbandingan (N1)60 dengan (N1)60cs

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, ditemukan bahwa karakteristik stratigrafi tanah pada lokasi penelitian memiliki kerentanan yang bervariasi terhadap guncangan seismik. Hasil pengolahan data SPT dan perhitungan parameter tegangan pada titik BH-1 menunjukkan adanya korelasi kuat antara kedalaman, tekanan air pori, dan nilai ketahanan tanah pasiran. Seluruh parameter teknis yang menjadi dasar analisis sensitivitas ini dirangkum secara mendetail dalam Tabel 2.

Tabel 2. Perhitungan (N1)60 dengan (N1)60cs

z (m)	NSPT	σ_v (kN/m ²)	μ (kN/m ²)	σ'_v (kN/m ²)	CN	CE	CB	CR	CS	(N1)60	(N1)60cs
2.45	6	36.59	-	36.59	1.40	1	1	0.75	1	6.32	12.59
4.45	14	80.41	-	80.41	1.10	1	1	0.75	1	11.53	18.83
6.45	24	129.90	63.27	66.62	1.18	1	1	0.75	1	21.22	30.46
8.45	8	124.43	82.89	41.53	1.36	1	1	0.75	1	8.17	14.81
10.45	2	119.63	102.51	17.11	1.60	1	1	0.75	1	2.41	7.89
12.45	14	248.70	122.13	126.57	0.89	1	1	0.75	1	9.37	16.24
14.45	4	221.81	141.75	80.05	1.10	1	1	0.75	1	3.30	8.96
16.45	5	248.40	161.37	87.02	1.06	1	1	0.75	1	3.99	9.78
18.45	11	404.69	180.99	223.69	0.64	1	1	0.75	1	5.28	11.34
20.45	27	373.12	200.61	172.50	0.75	1	1	0.75	1	15.23	23.28
22.45	59	474.54	220.23	254.31	0.59	1	1	0.75	1	26.01	36.21
24.45	60	517.30	239.85	277.45	0.55	1	1	0.75	1	24.91	34.89
26.45	57	557.73	259.47	298.26	0.53	1	1	0.75	1	22.49	31.98
28.45	58	600.70	279.09	321.61	0.50	1	1	0.75	1	21.67	31.01
30.45	60	644.25	298.71	345.53	0.47	1	1	0.75	1	21.27	30.52

Hasil pengolahan data pada Tabel 2 menunjukkan tren peningkatan nilai (N1)60 dan (N1)60cs seiring bertambahnya kedalaman, yang mencerminkan peningkatan kepadatan tanah dan tegangan efektif (σ'_v) Namun, anomali berupa penurunan signifikan nilai (N1)60 hingga titik terendah 2,41 ditemukan pada rentang kedalaman 10,45 m – 18,45 m, yang mengindikasikan keberadaan lapisan tanah lepas (*loose layer*) dengan daya dukung rendah. Secara visual, kurva (N1)60cs secara konsisten berada di sisi kanan kurva (N1)60. Selisih ini menunjukkan pengaruh faktor koreksi butir halus (*fine content correction*) yang meningkatkan nilai ekuivalen penetrasi ke kondisi pasir bersih (*clean sand*). Dari aspek seismik, zona kedalaman 8,45 m hingga 18,45 m diidentifikasi sebagai lapisan paling kritis dengan kerentanan tinggi terhadap guncangan, sebelum nilai kekuatan kembali stabil dan meningkat secara signifikan di atas kedalaman 20,45 m. Hal tersebut pada terlihat pada Gambar 3.

Gambar 3. Kurva Perbandingan nilai $(N1)60$ dengan $(N1)60cs$

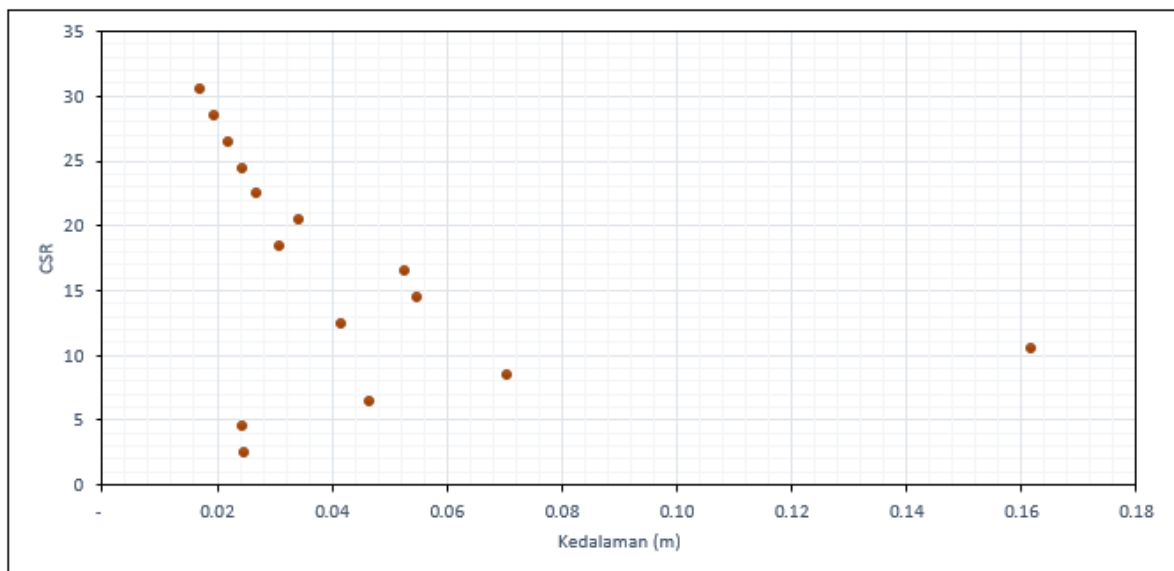
Analisis *Cyclic Stress Ratio (CSR)* dan *Cyclic Resistance Ratio (CRR)*

Evaluasi potensi likuifaksi pada lokasi penelitian dilakukan dengan membandingkan nilai CSR dengan CRR. Analisis ini melibatkan perhitungan nilai CRR dengan variasi kekuatan gempa mulai dari 5,0 SR hingga 7,5 SR untuk melihat sensitivitas ketahanan tanah terhadap berbagai skala guncangan. Parameter CSR yang merepresentasikan beban seismik dan distribusi nilai CRR pada berbagai magnitudo tersebut dirangkum dalam Tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan CSR dan CRR

z (m)	rd	α_{max}	CSR	CRR7,5	CRR5	CRR5,5	CRR6	CRR6,5	CRR7
2.45	0.98	0.3798	0.02	0.14	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04
4.45	0.97	0.3798	0.02	0.19	0.20	0.19	0.16	0.14	0.13
6.45	0.95	0.3798	0.05	0.52	0.77	0.72	0.64	0.56	0.49
8.45	0.94	0.3798	0.07	0.15	0.26	0.24	0.21	0.18	0.16
10.45	0.92	0.3798	0.16	0.10	0.17	0.16	0.14	0.13	0.11
12.45	0.84	0.3798	0.04	0.17	0.55	0.51	0.45	0.39	0.35
14.45	0.79	0.3798	0.05	0.11	0.34	0.32	0.28	0.25	0.22
16.45	0.73	0.3798	0.05	0.12	0.40	0.38	0.33	0.29	0.25
18.45	0.68	0.3798	0.03	0.13	0.71	0.66	0.58	0.51	0.45
20.45	0.63	0.3798	0.03	0.25	1.17	1.10	0.96	0.85	0.74
22.45	0.57	0.3798	0.03	1.45	7.47	7.00	6.15	5.40	4.73
24.45	0.52	0.3798	0.02	1.08	6.18	5.79	5.09	4.47	3.92
26.45	0.47	0.3798	0.02	0.64	4.07	3.81	3.35	2.94	2.58
28.45	0.41	0.3798	0.02	0.56	3.83	3.59	3.15	2.77	2.43
30.45	0.36	0.3798	0.02	0.52	3.86	3.61	3.17	2.79	2.44

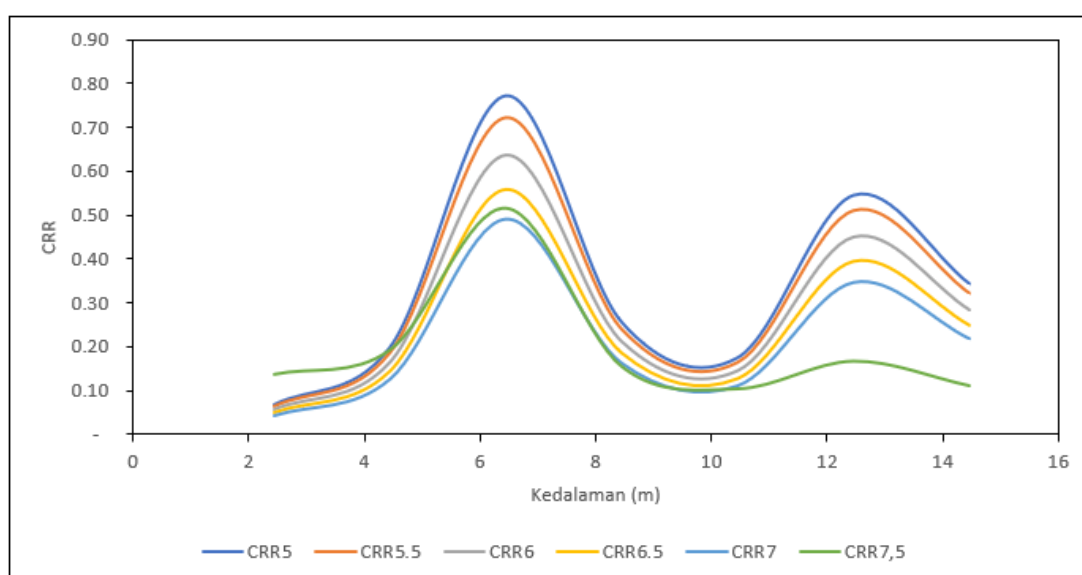
Berdasarkan data pada Tabel 3, sebaran nilai CSR terhadap kedalaman menunjukkan pola yang menarik sebagaimana divisualisasikan pada Gambar 4. Secara umum, nilai CSR cenderung fluktuatif namun menunjukkan konsentrasi beban yang signifikan pada kedalaman tertentu. Analisis lebih mendalam mengungkapkan bahwa pada kedalaman sekitar 10,45 meter, beban seismik mencapai titik puncaknya dengan nilai CSR sebesar 0,16. Akumulasi beban pada kedalaman ini merepresentasikan intensitas guncangan maksimum yang harus dipikul oleh lapisan tanah tersebut saat terjadi peristiwa seismik.



Gambar 4. Kondisi CSR

Evaluasi terhadap profil ketahanan tanah menunjukkan bahwa parameter CRR memiliki keterkaitan erat dengan beban yang diterima, di mana ketahanan tanah sangat dipengaruhi oleh magnitudo gempa yang terjadi. Peningkatan kekuatan gempa secara bertahap dari 5,0 ke 7,5 SR secara konsisten menurunkan nilai CRR, yang mengindikasikan bahwa semakin besar energi gempa yang dilepaskan, semakin rendah kemampuan tanah untuk mempertahankan stabilitas strukturnya. Hal ini terlihat jelas pada kedalaman 10,45 meter, di mana nilai CRR berada pada titik terendahnya, terutama pada skenario gempa 7,5 SR.

Kondisi dimana nilai beban (CSR) melampaui atau mendekati nilai daya dukung siklik (CRR) pada kedalaman tersebut merupakan indikator kuat bahwa lapisan tersebut memiliki risiko likuifaksi yang tinggi. Meskipun terdapat area dengan perlawanan yang cukup baik pada kedalaman 6,45 meter dan 12,45 meter, keamanan formasi tanah secara menyeluruh baru terlihat stabil pada kedalaman di atas 20,45 meter. Pada lapisan dalam tersebut, nilai CRR meningkat drastis hingga melampaui angka 1,0. Hal ini menandakan bahwa pada bagian yang lebih dalam, tanah memiliki kepadatan yang sangat masif sehingga mampu mengeliminasi potensi likuifaksi meskipun dipicu oleh guncangan seismik yang kuat. Karakteristik variasi ketahanan terhadap magnitudo gempa ini dirangkum secara visual dalam grafik di bawah ini.



Gambar 5. Perbandingan CRR 5 – 7,5 SR

Analisis Safety Factor (Fs)

Tahap akhir dalam evaluasi ini adalah penentuan nilai FS yang diperoleh dari rasio antara kapasitas perlawanan tanah (CRR) dan beban seismik yang bekerja (CSR). Nilai FS menjadi indikator definitif dalam menentukan kerentanan suatu lapisan; di mana nilai FS <1, umumnya dikategorikan sebagai zona rawan likuifaksi, sedangkan FS > 1 dianggap sebagai zona aman. Tabel 4 di bawah ini merangkum hasil perhitungan FS pada berbagai variasi magnitudo gempa untuk setiap kedalaman titik pengamatan.

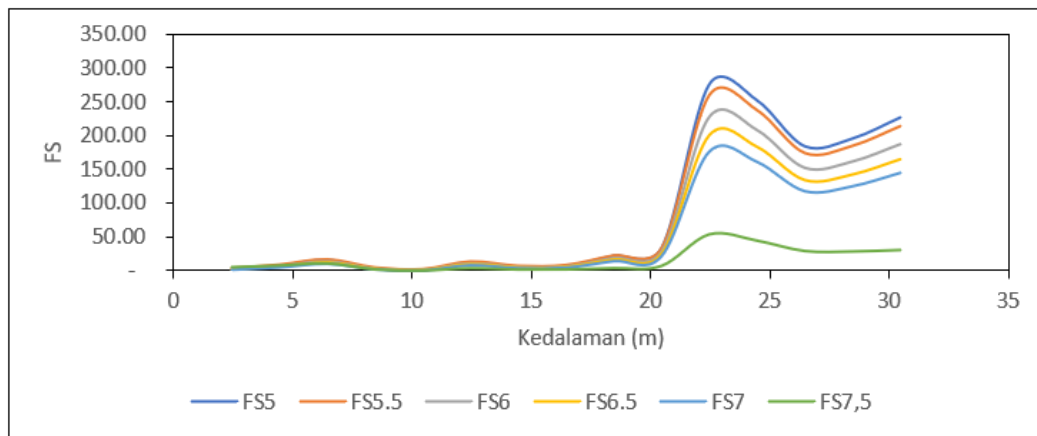
Tabel 4. Perhitungan *Safety Factor* (Fs)

z (m)	FS5	FS5.5	FS6	FS6.5	FS7	FS7,5
2.45	2.75	2.57	2.26	1.98	1.74	5.54
4.45	8.17	7.66	6.73	5.91	5.18	7.92
6.45	16.55	15.51	13.62	11.96	10.49	11.05
8.45	3.62	3.40	2.98	2.62	2.30	2.19
10.45	1.08	1.01	0.89	0.78	0.68	0.64
12.45	13.10	12.27	10.78	9.47	8.30	4.01
14.45	6.25	5.85	5.14	4.51	3.96	2.02
16.45	7.60	7.12	6.26	5.49	4.82	2.21
18.45	22.77	21.34	18.74	16.46	14.44	4.11
20.45	34.25	32.09	28.19	24.75	21.71	7.44
22.45	276.82	259.38	227.86	200.03	175.48	53.60
24.45	252.88	236.95	208.15	182.73	160.30	44.31
26.45	184.93	173.28	152.22	133.63	117.23	29.19
28.45	196.51	184.12	161.75	142.00	124.57	28.52
30.45	227.65	213.31	187.38	164.50	144.31	30.66

Berdasarkan hasil pengolahan data pada Tabel 4, terlihat korelasi yang sangat kuat antara kedalaman lapisan tanah dengan potensi terjadinya likuifaksi. Pada lapisan dangkal hingga menengah, tepatnya di kedalaman 10,45 meter, ditemukan kondisi paling kritis di mana nilai FS secara konsisten menurun seiring bertambahnya magnitudo gempa. Pada kekuatan gempa 6,0 SR, nilai FS sudah berada di angka 0,89 dan terus merosot hingga mencapai 0,64 pada skenario gempa 7,5 SR. Sesuai dengan ketentuan teknis yang menyatakan bahwa nilai FS di bawah 1,0 menandakan terjadinya likuifaksi, maka lapisan pada kedalaman ini dipastikan akan mengalami kegagalan struktur tanah akibat beban seismik yang melebihi kapasitas perlawanan tanahnya.

Analisis lebih lanjut pada grafik menunjukkan adanya fluktuasi keamanan di zona kedalaman 2,45 meter hingga 18,45 meter, namun secara umum zona tersebut masih berada dalam kategori aman karena nilai FS tetap bertahan di atas ambang batas 1,1, kecuali pada titik kritis 10,45 meter tadi. Fenomena yang sangat kontras mulai terlihat saat memasuki kedalaman di atas 20 meter, di mana grafik menunjukkan lonjakan nilai FS yang sangat tajam. Pada kedalaman 22,45 meter misalnya, nilai FS mencapai angka tertinggi yaitu 276,82 untuk gempa 5,0 SR dan tetap berada pada level yang sangat aman yakni 53,60 bahkan saat diguncang gempa 7,5 SR.

Kondisi ini memberikan gambaran komprehensif bahwa profil tanah di lokasi penelitian memiliki lapisan pendukung yang sangat stabil di bagian bawah, yang ditandai dengan nilai perlawanan tanah (CRR) yang jauh melampaui beban seismik (CSR) yang bekerja. Secara keseluruhan, meskipun sebagian besar lapisan tanah menunjukkan ketahanan yang baik, keberadaan nilai FS di bawah 1,0 pada kedalaman 10,45 meter menjadi bukti kuantitatif bahwa risiko likuifaksi tetap ada dan terpusat pada satu lapisan spesifik, sehingga memerlukan perhatian khusus dalam perencanaan fondasi atau perbaikan tanah di lokasi tersebut. Kondisi tersebut dapat terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Profil FS terhadap Kedalaman pada Berbagai Magnitudo Gempa

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis sensitivitas potensi likuifaksi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa karakteristik stratigrafi tanah pada lokasi penelitian menunjukkan kerentanan yang sangat spesifik dan dipengaruhi secara signifikan oleh skala magnitudo gempa. Temuan utama menunjukkan adanya lapisan tanah lepas (*loose layer*) pada kedalaman kritis 10,45 meter yang memiliki nilai $(N_1)_{60cs}$ terendah sebesar 7,89 dan tegangan efektif (σ'_v) yang minim akibat tekanan air pori yang tinggi. Pada titik ini, beban seismik mencapai puncak maksimum dengan nilai CSR sebesar 0,16, sementara kapasitas perlawanan tanah (CRR) secara konsisten menurun seiring meningkatnya skala gempa dari 5,0 SR hingga 7,5 SR. Hal ini berdampak langsung pada nilai Faktor Keamanan (FS), di mana pada guncangan gempa 6,0 SR nilai FS sudah mencapai 0,89 dan merosot hingga 0,64 pada skenario 7,5 SR, yang menandakan terjadinya kegagalan struktur tanah akibat likuifaksi. Secara kontras, stabilitas tanah meningkat secara masif pada kedalaman di atas 20,45 meter dengan nilai FS yang tetap terjaga sangat aman bahkan pada beban seismik tertinggi. Dengan demikian, risiko likuifaksi pada lokasi ini teridentifikasi secara kuantitatif terpusat pada kedalaman 10,45 meter, sehingga memerlukan perhatian khusus dalam penentuan kedalaman fondasi atau strategi perbaikan tanah guna memastikan keamanan infrastruktur terhadap variasi guncangan gempa di masa depan.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, maka saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Mengingat tingginya sensitivitas lapisan tanah pada kedalaman 10,45 meter terhadap variasi magnitudo gempa, para perencana infrastruktur disarankan untuk memastikan kedalaman fondasi tiang (*pile foundation*) mencapai lapisan tanah keras di bawah kedalaman 22 meter guna menjamin keamanan struktur terhadap potensi kehilangan gesekan selimut (*skin friction*) akibat likuifaksi.
2. Perlu dilakukan pengujian laboratorium lebih lanjut, seperti uji *cyclic triaxial* atau uji *simple shear*, untuk mendapatkan nilai ketahanan tanah yang lebih presisi dan memvalidasi hasil korelasi empiris dari data *Standard Penetration Test* (SPT) yang digunakan dalam penelitian ini.
3. Penelitian selanjutnya disarankan untuk tidak hanya memvariasikan nilai magnitudo gempa (M_w), tetapi juga memvariasikan parameter percepatan tanah maksimum (a_{max}) serta memperhitungkan durasi guncangan yang lebih spesifik berdasarkan sejarah gempa lokal untuk mendapatkan gambaran kerentanan yang lebih komprehensif.
4. Mengingat analisis ini didasarkan pada data dari satu lokasi spesifik, penelitian selanjutnya diharapkan dapat mencakup sebaran titik bor yang lebih luas di wilayah Medan guna memetakan zonasi risiko likuifaksi secara spasial.
5. Pada area yang teridentifikasi memiliki lapisan kritis dengan nilai $FS < 1,0$, disarankan untuk mempertimbangkan metode perbaikan tanah (*ground improvement*) seperti *vibro-flotation*, *deep soil mixing*, atau penggunaan *stone columns* sebelum konstruksi dimulai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Banjarnahor dan T. E. Wulandari. “Studi Potensi Likuifaksi dengan Pendekatan Cyclic Resistance Ratio dan Cyclic Stress Ratio di Sempadan Danau Toba”. *Jurnal Teknik SILITEKS*, vol. 5, no. 3, 2025.
- [2] R. Wiradisastra, dkk. “Analisis Potensi Likuifaksi di Kabupaten Jepara dengan Menggunakan Metode CSR dan CRR”. *Jurnal Teknik SILITEKS*, vol. 5, no. 2, 2025.
- [3] H. Warman dan D. Y. Jumas. “Kajian Potensi Likuifaksi Pasca Gempa dalam Rangka Mitigasi Bencana di Padang”. *Jurnal Rekayasa Sipil*, vol. 9, no. 2, halaman 1-10, 2013.
- [4] R. Anggraini dan R. Surbakti. “Analisis Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data SPT pada Proyek Pembangunan Menara BRI Kota Medan”. *AGREGAT: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, vol. 3, no. 1, 2023.
- [5] S. N. I. Sari dan R. S. Bintang. “Analisis Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data Cone Penetration Test (Studi Kasus Belawan, Medan)”. *Jurnal Bangunan: Konstruksi & Desain*, vol. 1, no. 3, 2023.
- [6] M. S. P. Panggabean dan T. E. Wulandari. “Analisis Likuifaksi Berdasarkan Data SPT dan Parameter Fisik Tanah di Kawasan Sibanggor Toga Mandailing Natal”. *Jurnal Teknik SILITEKS*, vol. 5, no. 3, 2025.
- [7] I. M. Idriss dan R. W. Boulanger. “SPT-Based Liquefaction Triggering Procedures”. Report No. UCD/CGM-10/02, University of California, Davis, 2010.
- [8] H. Tarigan dan R. Tarigan. “Analisis Potensi Likuifaksi pada Kawasan Medan Belawan”. *Portal: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 14, no. 1, 2022.
- [9] I. M. Idriss. “An Update to the SPT-Based Liquefaction Triggering Procedure”. *Earthquake Spectra*, vol. 15, no. 3, halaman 407-431, 1999.
- [10] K. C. Tijow, O. B. A. Sompie, dan J. H. Ticoh. “Analisis Potensi Likuifaksi Tanah Berdasarkan Data Standart Penetration Test (SPT) Studi Kasus: Dermaga Bitung, Sulawesi Utara”. *Jurnal Sipil Statik*, vol. 6, no. 7, halaman 491-500, 2018.
- [11] D. M. Mangunpraja dan A. Prihatiningsih. “Analisis Perbaikan Tanah sebagai Bentuk Mitigasi Bencana Likuifaksi yang dapat Diaplikasikan Masyarakat di Palu”. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, vol. 2, no. 4, halaman 95-104, 2019.
- [12] Deswita Syaharani Jasmine, et al. “Site Specific Liquefaction Analysis for Infrastructure Resilience through Geotechnical and Geological Perspectives in Medan City, Indonesia”. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1607, no. 1, p. 012046, 2026, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1607/1/012046>.