



Analisis Potensi Likuefaksi pada Lapisan Pasir dengan Metode Standard Penetration Test (SPT)

Rafly Hendriyansyah¹, Andikanoza Pradiptiya^{2,*}, Putera Agung Maha Agung³, Muhammad Fathur Rouf Hasan⁴

^{1,2,3}Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Jakarta, Indonesia

⁴Sekolah Pascasarjana, Universitas Brawijaya, Indonesia

¹Corresponding Author: andikanoza.pradiptiya@sipil.pnj.ac.id

Abstract

Liquefaction is a geotechnical phenomenon that has the potential to cause serious damage due to earthquakes, especially in saturated sandy soils. This study aims to analyze the potential for liquefaction in sand layers at the Langsa Depot Project site in Aceh, using an empirical approach based on Standard Penetration Test (SPT) data. The SPT blow values were corrected to $N_1(60)$, then used to calculate the Cyclic Resistance Ratio (CRR), which was compared to the Cyclic Stress Ratio (CSR) based on standard liquefaction evaluation procedures, thereby obtaining the Safety Factor (SF). The analysis was based on a single borehole to a depth of 50.5 m with planned earthquake parameters of magnitude 5.1 Mw and maximum ground acceleration of 0.2 g. Three silty sand layers at depths of 6–8 m, 28–35 m, and 48–49 m were analyzed because they were below the water table. The results show FS values of 1.083–1.168, 1.817–1.899, and 2.012, respectively, indicating that all sand layers are not prone to liquefaction in the earthquake scenario under review, although the shallow layers have a relatively low safety margin. This study emphasizes the importance of field data-based liquefaction evaluation as a basis for geotechnical design considerations in coastal areas.

Keywords: liquefaction, SPT, safety factor, sandy soil

Abstrak

Likuefaksi merupakan fenomena geoteknik yang berpotensi menimbulkan kerusakan serius akibat gempa bumi, terutama pada tanah pasir jenuh air. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi likuefaksi pada lapisan pasir di lokasi Proyek Depo Langsa, Aceh, menggunakan pendekatan empiris berbasis data Standard Penetration Test (SPT). Nilai pukulan SPT dikoreksi menjadi $N_1(60)$, kemudian digunakan untuk menghitung Cyclic Resistance Ratio (CRR), yang dibandingkan dengan Cyclic Stress Ratio (CSR) berdasarkan prosedur evaluasi likuefaksi standar, sehingga diperoleh Faktor Keamanan (FS). Analisis didasarkan pada satu titik bor hingga kedalaman 50,5 m dengan parameter gempa rencana berupa magnitudo 5,1 Mw dan percepatan tanah maksimum 0,2 g. Tiga lapisan silty sand yang berada pada kedalaman 6–8 m, 28–35 m, dan 48–49 m dianalisis karena berada di bawah muka air tanah. Hasil menunjukkan nilai FS berturut-turut sebesar 1,083–1,168; 1,817–1,899; dan 2,012, yang mengindikasikan bahwa seluruh lapisan pasir berada dalam kondisi tidak berpotensi likuefaksi pada skenario gempa yang ditinjau, meskipun lapisan dangkal memiliki margin keamanan yang relatif rendah. Studi ini menegaskan pentingnya evaluasi likuefaksi berbasis data lapangan sebagai dasar pertimbangan desain geoteknik di wilayah pesisir.

Kata kunci: likuefaksi, SPT, faktor keamanan, tanah pasir

Diterima Redaksi : 29-07-2025 | Selesai Revisi : 30-01-2026 | Diterbitkan Online : 31-01-2026

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat aktivitas seismik tertinggi di dunia karena terletak pada pertemuan Lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Interaksi tektonik tersebut membentuk zona subduksi aktif sepanjang pantai barat Sumatra yang sering memicu gempa bumi dengan intensitas menengah hingga besar. Provinsi Aceh termasuk wilayah yang berada dekat dengan sistem subduksi tersebut, sehingga memiliki tingkat kerentanan terhadap bahaya gempa bumi dan dampak turunannya. Selain kerusakan struktural langsung akibat guncangan, gempa juga dapat memicu berbagai permasalahan geoteknik, salah satunya adalah fenomena likuefaksi.

Likuefaksi merupakan kondisi ketika tanah jenuh air mengalami peningkatan tekanan air pori akibat pembebanan siklik gempa, sehingga tegangan efektif menurun secara signifikan dan tanah kehilangan kekuatan gesernya [1]. Dalam kondisi tersebut, tanah berperilaku menyerupai fluida dan tidak mampu mendukung beban struktur di atasnya. Fenomena ini umumnya terjadi pada tanah berbutir halus hingga sedang, seperti pasir lepas hingga pasir lanauan jenuh air. Dampak likuefaksi telah banyak dilaporkan dalam berbagai peristiwa gempa, di mana kerusakan yang terjadi meliputi penurunan tanah, kemiringan bangunan, retakan permukaan, serta kegagalan fondasi.

Potensi terjadinya likuefaksi sangat dipengaruhi oleh karakteristik fisik dan mekanik tanah, antara lain jenis butiran, kepadatan relatif, distribusi ukuran butir, kandungan butir halus (fines content), serta kondisi kejenuhan dan muka air tanah [2]. Selain faktor tanah, besarnya percepatan gempa maksimum, durasi guncangan, serta magnitudo gempa juga memegang peranan penting dalam menentukan besarnya beban siklik yang diterima tanah. Oleh karena itu, evaluasi potensi likuefaksi memerlukan pendekatan yang mampu menghubungkan parameter tanah dengan beban gempa secara kuantitatif.

Dalam praktik rekayasa geoteknik, evaluasi potensi likuefaksi sering dilakukan menggunakan pendekatan empiris berbasis uji in-situ, salah satunya Standard Penetration Test (SPT). Uji SPT banyak digunakan karena prosedurnya relatif sederhana, ekonomis, dan telah memiliki basis data empiris yang luas. Nilai pukulan SPT yang diperoleh dari lapangan dikoreksi menjadi nilai standar $N_{(60)}$ dengan mempertimbangkan faktor energi, tekanan overburden, panjang batang bor, diameter borehole, serta metode sampling [3]. Nilai terkoreksi tersebut digunakan untuk menentukan Cyclic Resistance Ratio (CRR) yang menggambarkan kapasitas tahanan siklik tanah. Selanjutnya, CRR dibandingkan dengan Cyclic Stress Ratio (CSR) yang merepresentasikan tegangan siklik akibat gempa, sehingga diperoleh Faktor Keamanan (FS) terhadap likuefaksi.

Meskipun metode berbasis SPT telah lama digunakan, penerapannya tetap relevan, terutama pada tahap investigasi awal atau pada lokasi dengan keterbatasan data geoteknik lanjutan seperti uji CPT atau pengukuran kecepatan gelombang geser. Di wilayah pesisir, seperti Kota Langsa, kondisi geologi umumnya didominasi oleh endapan aluvial muda yang tersusun atas pasir berlanau, lanau, dan lempung lunak dengan muka air tanah relatif dangkal. Karakteristik ini secara teoritis meningkatkan potensi likuefaksi apabila terjadi gempa bumi dengan intensitas cukup besar.

Metode evaluasi potensi likuefaksi terus berkembang dari pendekatan empiris hingga probabilistic [4]. Prosedur sederhana untuk mengevaluasi potensi likuefaksi adalah dengan berdasarkan nilai SPT yang telah dikoreksi, dan hingga kini metode tersebut masih banyak digunakan. Metode Standard Penetration Test (SPT) secara luas digunakan sebagai uji in-situ untuk memperoleh parameter teknis tanah, seperti kohesi, sudut geser dalam, dan berat isi tanah [5], dengan koreksi terhadap tekanan overburden dan kondisi lapangan lainnya, nilai N -SPT dapat dikonversi menjadi $N_{(60)}$ yang lebih representatif untuk analisis likuefaksi. Nilai ini kemudian digunakan untuk menghitung CRR dan dibandingkan dengan nilai CSR untuk menentukan potensi likuefaksi.

Penelitian terdahulu menekankan pentingnya visualisasi fenomena menggunakan media simulasi [6]. Namun, kajian yang secara spesifik mengevaluasi potensi likuefaksi berdasarkan data SPT lapangan pada wilayah Langsa masih terbatas. Padahal, ketersediaan data lokal sangat penting untuk mendukung perencanaan infrastruktur yang aman, khususnya pada fasilitas yang berfungsi vital seperti depo atau kawasan industri. Sementara itu, ada pula yang mengkaji pengaruh tekanan air pori terhadap kestabilan tanah [7] [8]. Namun, penelitian-penelitian tersebut belum secara spesifik mengevaluasi lapisan pasir jenuh di wilayah Langsa dengan data SPT aktual yang mendalam.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis nilai SPT dengan koreksi sesuai standar untuk menganalisis nilai FS terhadap likuefaksi [9]. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi likuefaksi pada lapisan pasir berdasarkan data uji Standard Penetration Test (SPT) di lokasi tersebut. Diharapkan hasilnya dapat menjadi referensi teknis dalam perencanaan dan mitigasi risiko geoteknik di wilayah Proyek Depo Langsa.

2. Metode Penelitian

Evaluasi potensi likuefaksi pada penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan empiris berbasis data Standard Penetration Test (SPT). Metode ini dipilih karena memiliki korelasi empiris yang luas antara nilai pukulan SPT dengan ketahanan tanah terhadap pembebanan siklik gempa. Analisis dilakukan melalui tahapan koreksi nilai SPT,

perhitungan tegangan tanah, penentuan beban siklik gempa (CSR), penentuan tahanan siklik tanah (CRR), hingga evaluasi Faktor Keamanan (FS).

2.1. Lokasi dan Kondisi Studi

Lokasi penelitian berada di kawasan Proyek Depo Langsa, Kota Langsa, Provinsi Aceh. Wilayah ini termasuk daerah pesisir timur Sumatra yang tersusun atas endapan aluvial muda. Secara geologi, material penyusun didominasi oleh pasir berlanau (silty sand), lanau, dan lempung lunak yang terbentuk dari proses sedimentasi fluvial dan marin. Muka air tanah di lokasi relatif dangkal, sekitar 1 meter dari permukaan, sehingga sebagian besar lapisan pasir berada dalam kondisi jenuh air.

Dari aspek seismotektonik, wilayah Aceh dipengaruhi oleh aktivitas zona subduksi Sumatra serta sesar-sesar lokal, sehingga memiliki potensi mengalami guncangan gempa yang dapat memicu respons tanah dinamis. Untuk mendukung deskripsi lokasi, peta wilayah studi dilengkapi dengan legenda ditampilkan pada Gambar 1 (Peta Kota Langsa) yang diadaptasi dari data Pemerintah Kota Langsa.



Gambar 1 Lokasi Studi Area

2.2. Data Lapangan

Data utama penelitian berupa hasil uji SPT dari satu titik bor dengan kedalaman total 50,5 m. Pengujian dilakukan pada interval kedalaman 2 meter. Nilai pukulan SPT dicatat sebagai indikator kepadatan relatif tanah dan digunakan dalam evaluasi likuefaksi.

Selain data SPT, parameter pendukung yang digunakan meliputi berat volume tanah (γ), kedalaman muka air tanah, percepatan gempa maksimum ($PGA = 0,2 \text{ g}$), dan magnitudo gempa rencana ($M_w = 5,1$). Variabel-variabel ini dipilih karena saling berkaitan dalam mempengaruhi besarnya potensi likuefaksi [10].

2.3. Koreksi Nilai SPT

Pengolahan data dilakukan melalui tahap koreksi nilai pukulan SPT dengan mempertimbangkan faktor tekanan overburden, energi, panjang batang bor, diameter borehole, dan jenis sampler, sehingga diperoleh nilai N-SPT terkoreksi [11]. Nilai pukulan lapangan (N) dikoreksi untuk memperoleh nilai standar N_{60} , menggunakan persamaan (1):

$$N_{60} = N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \quad (1)$$

di mana:

C_E = faktor koreksi energi palu

C_B = faktor diameter borehole

C_R = faktor panjang batang bor

C_S = faktor jenis sampler

Selanjutnya dilakukan koreksi tekanan overburden menggunakan persamaan (2) :

$$(N_1)_{60} = C_N \cdot N_{60} \quad (2)$$

Dengan C_N sebagai faktor koreksi tekanan efektif vertikal.

2.4. Perhitungan Tegangan Tanah

Tegangan vertikal total dihitung dengan persamaan 3.

$$\sigma_v = \gamma \cdot z \quad (3)$$

Sedangkan tegangan efektif dihitung dengan persamaan 4.

$$\sigma'_v = \sigma_v - u \quad (4)$$

dengan u adalah tekanan air pori yang bergantung pada kedalaman muka air tanah. Korelasi empiris antara nilai pukulan SPT dan CSR memiliki keandalan tinggi pada tanah pasir jenuh, terutama dalam konteks gempa dengan magnitudo sedang [12]. Faktor reduksi tegangan (r_d) merupakan komponen penting dalam perhitungan Cyclic Stress Ratio (CSR), karena menggambarkan pelemahan tegangan siklik seiring bertambahnya kedalaman. Nilai r_d digunakan untuk mengoreksi distribusi tegangan gempa pada lapisan tanah bawah permukaan.

2.5. Perhitungan Cyclic Stress Ratio (CSR)

CSR dihitung untuk merepresentasikan beban siklik akibat gempa seperti pada persamaan (5).

$$CSR = 0,65 \cdot \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \cdot r_d \quad (5)$$

Faktor reduksi tegangan r_d digunakan untuk memperhitungkan pelemahan tegangan geser dengan bertambahnya kedalaman.

2.6. Perhitungan Cyclic Resistance Ratio (CRR)

CRR dihitung berdasarkan korelasi empiris dengan nilai $(N_1)_{60}$ untuk gempa referensi magnitudo 7,5 seperti pada persamaan (6).

$$CRR = CRR_{7,5} \cdot MSF \quad (6)$$

dengan MSF (Magnitude Scaling Factor) digunakan untuk menyesuaikan nilai CRR terhadap magnitudo gempa rencana.

2.7. Evaluasi Faktor Keamanan

Faktor Keamanan terhadap likuefaksi dihitung dengan persamaan (7).

$$F_s = \frac{CRR}{CSR} \quad (7)$$

Interpretasi dilakukan sebagai berikut:

$FS < 1 \rightarrow$ Berpotensi likuefaksi

$FS > 1 \rightarrow$ Tidak berpotensi likuefaksi

2.8. Batasan Metode

Analisis dilakukan berdasarkan satu titik bor dan satu skenario gempa rencana. Variasi lateral tanah, pengaruh beban struktur, serta pendekatan berbasis CPT atau kecepatan gelombang geser tidak termasuk dalam ruang lingkup penelitian ini.

2.9. Klasifikasi Tanah dan Identifikasi Lapisan Rentan

Klasifikasi tanah dilakukan berdasarkan deskripsi borlog serta nilai pukulan SPT. Identifikasi lapisan yang berpotensi likuefaksi difokuskan pada tanah berbutir kasar hingga menengah (pasir dan pasir berlanau) yang berada di bawah muka air tanah. Parameter yang menjadi perhatian utama meliputi Nilai N-SPT terkoreksi $(N_1)_{60}$, kondisi kejenuhan tanah, kedalaman lapisan, kepadatan relatif tanah.

Lapisan dengan nilai $(N_1)_{60}$ rendah hingga sedang pada kondisi jenuh dianggap lebih rentan terhadap peningkatan tekanan air pori akibat pembebanan siklik.

2.10. Faktor Reduksi Tegangan (r_d)

Faktor reduksi tegangan r_d digunakan untuk menggambarkan penurunan tegangan geser siklik seiring bertambahnya kedalaman tanah. Nilai r_d ditentukan berdasarkan hubungan empiris terhadap kedalaman, di mana pada lapisan dangkal nilai r_d mendekati 1, dan menurun secara bertahap pada kedalaman yang lebih besar. Penggunaan faktor ini penting agar distribusi tegangan gempa yang dihitung lebih representatif terhadap kondisi bawah permukaan.

2.11. Magnitude Scaling Factor (MSF)

Karena nilai CRR empiris umumnya dikalibrasi untuk gempa dengan magnitudo 7,5, diperlukan faktor koreksi magnitudo atau Magnitude Scaling Factor (MSF). MSF memperhitungkan pengaruh durasi dan jumlah siklus pembebanan gempa terhadap respons tanah. Untuk magnitudo lebih kecil dari 7,5, nilai MSF lebih besar dari 1, yang menunjukkan bahwa tanah memiliki ketahanan relatif lebih tinggi terhadap gempa berdurasi lebih pendek.

2.12. Kriteria Interpretasi Hasil

Evaluasi potensi likuefaksi dilakukan berdasarkan nilai F_s seperti pada Tabel 1. Dan nilai N koreksi seperti pada tabel 2. Pendekatan ini digunakan untuk memberikan interpretasi yang lebih praktis dalam konteks rekayasa geoteknik.

Tabel 1. Interpretasi Nilai F_s

Nilai F_s	Interpretasi
$F_s < 1$	Berpotensi likuefaksi
$1 \leq F_s \leq 1,2$	Kondisi batas / margin keamanan rendah
$F_s > 1,2$	Kondisi relatif aman

Tabel 2 Nilai N koreksi

Factor	Equipment Variabel	Term	Correction
Overburden	-	C_N	
Pressure	-	C_N	
	Donut Hammer	C_E	0,5 – 1,0
Energy Ratio	Safety Hammer	C_E	0,7 – 1,2

	Automatic-trip Donut	C_E	0,8 – 1,3
	Type Hammer		
	65 – 115 mm	C_B	1
Borehole	150 mm	C_B	1,05
Diameter	200 mm	C_B	1,15
	< 3 mm	C_R	0,75
	3 – 4 mm	C_R	0,8
Rod Length	4 – 6 mm	C_R	0,85
	6 – 10 mm	C_R	0,95
	10 – 30 mm	C_R	1,0
Sampling	Standard Sampler	C_S	1,0
Method	Sampler without Liners	C_S	1,1 – 1,3

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil

Evaluasi potensi likuefaksi pada lokasi penelitian dilakukan berdasarkan parameter geoteknik yang diperoleh dari investigasi lapangan dan dianalisis secara kuantitatif menggunakan pendekatan empiris berbasis Standard Penetration Test (SPT). Pengujian SPT dilaksanakan hingga kedalaman 50,5 m pada satu titik bor yang dianggap mewakili kondisi stratigrafi lokasi studi. Pengambilan data dilakukan pada interval kedalaman 2 m untuk memperoleh variasi nilai pukulan tanah (N-SPT) terhadap kedalaman. Nilai pukulan ini digunakan sebagai indikator kepadatan relatif tanah, yang selanjutnya berperan penting dalam evaluasi ketahanan tanah terhadap pembebanan siklik akibat gempa.

Nilai N-SPT lapangan tidak langsung digunakan dalam analisis, tetapi terlebih dahulu dikoreksi menjadi nilai standar $(N_1)_{60}$. Koreksi ini mempertimbangkan faktor energi palu, tekanan overburden, panjang batang bor, diameter borehole, serta jenis sampler yang digunakan selama pengujian. Tujuan koreksi ini adalah untuk menghilangkan pengaruh kondisi pengujian sehingga nilai yang diperoleh lebih representatif dan dapat digunakan dalam korelasi empiris untuk penentuan Cyclic Resistance Ratio (CRR). Nilai $(N_1)_{60}$ yang dihasilkan kemudian menjadi parameter utama dalam menentukan kapasitas tahanan siklik tanah terhadap beban gempa.

Berdasarkan interpretasi data borlog, profil tanah di lokasi penelitian secara umum didominasi oleh lapisan lempung kelanauan (silty clay) yang bersifat relatif lunak hingga sedang, dengan beberapa sisipan lensa pasir berlanau (silty sand). Lapisan pasir ini tidak terdistribusi secara kontinu, melainkan muncul pada kedalaman tertentu sebagai lensa atau selingan dalam matriks tanah berbutir halus. Keberadaan lapisan pasir tersebut menjadi perhatian utama dalam penelitian ini karena tanah berbutir kasar yang berada dalam kondisi jenuh air merupakan media yang paling rentan terhadap terjadinya likuefaksi.

Selain itu, muka air tanah yang dangkal, yaitu sekitar 1 m dari permukaan tanah, menyebabkan sebagian besar lapisan pasir berada dalam kondisi jenuh. Kondisi kejenuhan ini sangat berpengaruh terhadap respons dinamis tanah, karena peningkatan tekanan air pori selama pembebanan siklik gempa dapat menurunkan tegangan efektif tanah secara signifikan. Oleh karena itu, tiga zona lapisan silty sand yang teridentifikasi pada profil tanah dipilih sebagai fokus analisis, karena secara teoritis memiliki potensi paling besar mengalami respons likuefaksi dibandingkan lapisan lempung di sekitarnya. Klasifikasi tanah dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Klasifikasi Tanah

No.	Kedalaman (m)	Jenis Tanah	$\bar{N}$	N'
1	6 – 8,9	<i>Silty Sand</i>	9,18	9,18
2	28 – 34, 7	<i>Silty Sand</i>	42,55	42,55
3	48 – 48,5	<i>Silty Sand</i>	32,08	16,04

Ketiga lapisan pasir tersebut berada di bawah muka air tanah yang relatif dangkal, yaitu hanya 1 meter dari permukaan tanah, sehingga menjadikan kondisi tanah berada dalam keadaan jenuh air sepenuhnya. Keadaan ini secara geoteknikal meningkatkan potensi terjadinya likuefaksi, mengingat bahwa likuefaksi sangat rentan terjadi

pada tanah berpasir jenuh dengan kepadatan rendah hingga sedang. Nilai CSR dan CRR dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Nilai CSR & CRR

No	Jenis Tanah	Kedalaman	a_{max}	CSR	CRR
1	<i>Silty Sand</i>	6 – 8,9	0,2 g	0,138 – 0,151	0,139 – 0,158
2	<i>Silty Sand</i>	28 – 34,7	0,2 g	0,067 – 0,074	0,130
3	<i>Silty Sand</i>	48 – 48,5	0,2 g	0,066	0,131

Perhitungan Cyclic Stress Ratio (CSR) dilakukan untuk masing-masing lapisan dengan mempertimbangkan nilai percepatan gempa maksimum (a_{max}) sebesar 0,2 g, berdasarkan peta percepatan gempa dari SNI 1726:2019 untuk wilayah Kota Langsa. Rasio antara CRR dan CSR memberikan hasil perhitungan Faktor Keamanan (FS) yang menjadi indikator utama dalam menilai kerentanan tanah terhadap likuefaksi. Nilai FS diperoleh dengan ketentuan yang dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5 Nilai FS Pada Jenis *Silty Sand*

Kedalaman (m)	CRR	CSR	P[L]	FS	Keterangan
6 – 8,9	0,139 – 0,158	0,138 – 0,151	100	1,004 – 1,045	Tidak Likuefaksi
28 – 34,7	0,130	0,067 – 0,074	100	1,756 – 1,960	Tidak Likuefaksi
48 – 48,5	0,131	0,066	100	1,982 – 1,983	Tidak Likuefaksi

3.2 Pembahasan

Berdasarkan hasil perhitungan nilai CSR, CRR, dan Faktor Keamanan (FS) pada tiga lapisan pasir di lokasi Proyek Depo Langsa, terlihat bahwa semua nilai FS > 1. Hal ini menunjukkan bahwa secara teoritis lapisan pasir tersebut tidak berpotensi mengalami likuefaksi pada kondisi gempa dengan magnitudo 5,1 Mw dan percepatan 0,2 g sesuai dengan SNI 1726:2019.

Likuefaksi umumnya terjadi pada lapisan pasir jenuh air dengan kepadatan rendah, tekanan air pori tinggi, dan beban siklik yang signifikan. Tanah silty sand sangat rentan terhadap likuefaksi tergantung tingkat kejenuhannya, plastisitas, serta kepadatan relative, hal ini sesuai dengan karakteristik tanah yang ditemukan di lokasi penelitian [13].

Data borlog menunjukkan bahwa meskipun lapisan pasir terletak di bawah muka air tanah yang dangkal (sekitar 1 meter), kepadatan relatifnya cukup tinggi di kedalaman 28–35 m dan 48–49 m, sehingga memberikan daya tahan yang baik terhadap pembebanan siklik. Pada lapisan pertama (6–8 m), meski nilai CSR mendekati CRR, nilai FS tetap berada sedikit di atas 1. Kondisi ini mengindikasikan bahwa lapisan pasir pada kedalaman dangkal masih memiliki resistansi terhadap deformasi likuefaksi meskipun beban sikliknya cukup besar. Kepadatan tanah dan nilai N-SPT yang tinggi setelah koreksi sangat berpengaruh dalam meningkatkan ketahanan tanah terhadap likuefaksi [14].

Perhitungan menggunakan faktor reduksi (rd) juga mendukung hasil ini. Nilai rd menunjukkan adanya penurunan tegangan geser efektif seiring bertambahnya kedalaman, namun pada lapisan yang lebih dalam, resistensi tanah (CRR) meningkat karena kepadatan tanah semakin tinggi. Faktor MSF (Magnitude Scaling Factor) yang disesuaikan dengan magnitudo lokal 5,1 Mw menghasilkan koreksi yang membuat nilai CRR lebih representatif untuk kondisi lokal. Hasil evaluasi ini mengindikasikan bahwa kondisi lapisan pasir di Proyek Depo Langsa relatif aman dari risiko likuefaksi. Meskipun demikian, mitigasi tetap disarankan, misalnya dengan perkuatan tanah lokal [15].

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa lapisan silty sand pada Proyek Depo Langsa, Aceh, memiliki faktor keamanan (FS) di atas 1, sehingga secara teoritik dinyatakan tidak berpotensi mengalami

likuefaksi pada kondisi gempa dengan magnitudo 5,1_{SR} dan percepatan 0,2 g. Kesimpulan ini memperlihatkan bahwa kondisi lapisan pasir di lokasi penelitian cukup padat untuk menahan beban siklik akibat gempa. Sebagai upaya untuk memperoleh hasil evaluasi yang lebih komprehensif, pendekatan kombinasi antara metode empiris dan pendekatan probabilistik dapat dijadikan rujukan dalam analisis potensi likuefaksi.

Daftar Rujukan

- [1] S. L. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall Upper Saddle River, 1996.
- [2] K. Terzaghi, R. B. Peck, and G. Mesri, *Soil Mechanics In Engineering Practice*, 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1943. doi: 10158-0012.
- [3] I. M. Idriss and R. . Boulanger, *Soil Liquefaction During Earthquakes*, MNO-12. United States: Earthquake Engineering Research Institute, 2008.
- [4] I. M. Idriss and B. H. Seed, "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential," *J. Soil Mech. Found. Div.*, vol. 70, no. 9, pp. 1249–1273, 1970.
- [5] P. A. M. Agung, M. F. R. Hasan, A. P. Dwiya, A. Susilo, and E. A. Suryo, "Slope Failure Lines Analysis to Determine Landslide Potential Based on Standard Penetration Test Method," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1351, no. 012029, 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1351/1/012029.
- [6] P. Pradana, F. Priyulida, and N. E. Lidya, "Analisis Ketahanan Jenis - Jenis Tanah Terhadap Likuefaksi Berbasis Arduino," *J. TEKESNOS*, vol. 3, no. 2, pp. 166–172, 2021.
- [7] P. A. M. Agung, M. A. Ahmad, and M. F. R. Hasan, "Probability Liquefaction On Silty Sand Layer On Central Jakarta," *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 14, no. 9, pp. 48–55, 2022, doi: 10.30880/ijie.2022.14.09.007.
- [8] P. A. M. Agung, R. Sultan, M. Idris, A. T. Sudjianto, M. A. Ahmad, and M. F. R. Hasan, "Probabilistic of in Situ Seismic Soil Liquefaction Potential Based on CPT-Data in Central Jakarta , Indonesia," *Int. J. Sustain. Constr. Eng. Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 241–248, 2023, doi: 10.30880/ijscet.2023.14.01.021.
- [9] T. L. Youd, I. M. Idriss, and R. D. Andrus, "Liquefaction Resistance of Soils : Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER / NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils," vol. 0241, no. June 2016, 2001, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127.
- [10] Standar Nasional Indonesia, "Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung," 2019.
- [11] P. K. Robertson and C. E. F. Wride, "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test," *Can. Geotech. J.*, vol. 35, pp. 442–457, 1998.
- [12] B. S. S. C. Liao, A. M. Asce, R. V Whitman, and F. Asce, "Overburden Correction Factors For Spt In Sand, 2 F. ASCE," *J. Geotech. Eng.*, vol. 112, no. 3, pp. 373–377, 1986.
- [13] J. D. Bray and R. B. Sancio, "Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Fine-Grained Soils," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 132, no. 9, pp. 1165–1177, 2006, doi: 10.1061/(ASCE)1090-02412006132:91165.
- [14] B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*, 7th ed. Stamford: Cengage Learning, 2010.
- [15] K. O. Cetin *et al.*, "Standard Penetration Test-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 130, no. 12, pp. 1314–1340, 2004, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:12(1314).