

ANALISIS LIKUEFAKSI PADA LAPISAN TANAH BERPASIR DI LOKASI PROYEK PABRIK, GRESIK, JAWA TIMUR

Amelia Yuwono^{1*}

¹Departemen Teknik Sipil, Universitas Kristen Krida Wacana, Jl. Tanjung Duren Raya No. 4, Jakarta Indonesia

*amelia.yuwono@ukrida.ac.id

Masuk: 01-07-2025, revisi: 30-07-2025, diterima untuk diterbitkan: 06-08-2025

ABSTRACT

In this study, an analysis was conducted to evaluate the potential for liquefaction at a factory project located in Manyar, Gresik, East Java. The analysis aimed to determine whether the sandy soil layer in the factory area has liquefaction potential. Liquefaction potential was evaluated by comparing the earthquake-induced loading with the soil's resistance to liquefaction. The potential was expressed as a factor of safety against liquefaction (FS_L). In addition, Cyclic Stress Ratio (CSR) calculations were carried out. Two methods were used to determine the Cyclic Resistance Ratio (CRR) values in this project: the Ishihara method (1979), the Yoshimi & Tokimatsu method (1984), the Boulanger & Idriss method (2014) and Andrus & Stokoe method. The data used in this study included soil investigation reports, downhole seismic test results, and earthquake maps. Based on the liquefaction analysis, no liquefaction potential was found at borehole SPT B02. However, since the project location is near a fault (based on the geological map of Surabaya and Quadrangle, Java), further checks on site classification based on SNI 1726:2019 are recommended.

Keywords: liquefaction potential; cyclic stress ratio; cyclic resistance ratio; earthquake; sandy soil

ABSTRAK

Penelitian ini melakukan analisis potensi likuefaksi pada proyek pabrik yang berlokasi di Manyar, Gresik, Jawa Timur. Analisis dilakukan untuk mengetahui apakah lapisan tanah berpasir di area pabrik berpotensi mengalami likuefaksi. Evaluasi potensi likuefaksi dilakukan dengan membandingkan beban gempa terhadap ketahanan tanah terhadap likuefaksi. Potensi likuefaksi dinyatakan sebagai faktor keamanan terhadap likuefaksi (FS_L). Selain itu, dilakukan juga perhitungan Cyclic Stress Ratio (CSR). Terdapat empat metode yang digunakan untuk menentukan nilai Cyclic Resistance Ratio (CRR) pada proyek ini, yaitu metode Ishihara (1979), Yoshimi & Tokimatsu (1984), Boulanger & Idriss (2014) dan Andrus & Stokoe (2000). Data yang digunakan meliputi laporan penyelidikan tanah, hasil uji downhole seismic, dan peta gempa. Berdasarkan hasil analisis likuefaksi, tidak ditemukan potensi likuefaksi pada lokasi lubang bor SPT B02. Namun, mengingat lokasi proyek dekat dengan sesar (berdasarkan peta geologi Surabaya dan Quadrangle, Jawa), disarankan dilakukan pengecekan lebih lanjut mengenai klasifikasi situs berdasarkan SNI 1726:2019.

Kata kunci: potensi likuefaksi; *cyclic stress ratio*; *cyclic resistance ratio*; gempa; tanah berpasir

1. PENDAHULUAN

Analisis potensi likuefaksi perlu dilakukan pada proyek pabrik di Manyar, Gresik, Jawa Timur, mengingat kondisi tanah yang berpasir dan lokasi proyek yang dekat dengan pantai. Likuefaksi adalah fenomena hilangnya kekuatan geser tanah tidak kohesif akibat peningkatan tekanan air pori selama gempa bumi, sehingga tanah berperilaku seperti cairan. Fenomena ini menimbulkan kerusakan seperti penurunan tanah, semburan pasir dan air, serta kegagalan fondasi. Likuefaksi umumnya terjadi pada tanah pasir jenuh berstruktur lepas dengan kepadatan rendah. Oleh karena itu, penelitian ini penting untuk menentukan risiko likuefaksi dan langkah mitigasinya.

Gempa bumi merupakan salah satu beban alami yang signifikan dalam perencanaan struktur, terutama di daerah dengan aktivitas seismik tinggi seperti Indonesia. Salah satu dampak gempa yang perlu diantisipasi adalah terjadinya likuefaksi, yaitu hilangnya kekuatan geser tanah jenuh berbutir halus akibat peningkatan tekanan air pori selama getaran gempa, sehingga tanah berperilaku seperti cairan (Seed & Idriss, 1971; Day, 2002). Fenomena ini menimbulkan kerusakan serius seperti penurunan tanah, semburan pasir dan air ke permukaan, pergeseran lateral, serta kegagalan fondasi bangunan (Uyanik, 2020; Boulanger & Idriss, 2014).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji likuefaksi di berbagai wilayah Indonesia dan negara lain. Kumar et al. (2023) melakukan evaluasi potensi likuefaksi berdasarkan data SPT dengan berbagai metode empiris, sedangkan

Aytaş et al. (2023) menekankan pentingnya penggunaan nilai kecepatan gelombang geser (V_s) dalam analisis likuefaksi. Di Turki, Bol et al. (2024) melaporkan kasus likuefaksi pasca gempa besar pada tanah pasir jenuh yang menyebabkan kerusakan masif pada infrastruktur. Selain itu, penelitian oleh Cetin et al. (2025) menunjukkan bahwa metode penilaian Cyclic Stress Ratio (CSR) dan Cyclic Resistance Ratio (CRR) masih menjadi pendekatan utama dalam penilaian potensi likuefaksi saat ini.

Permasalahan yang diangkat pada penelitian ini adalah belum dilakukannya evaluasi potensi likuefaksi secara komprehensif pada proyek pabrik yang berlokasi di Manyar, Gresik, Jawa Timur, padahal wilayah ini memiliki kondisi tanah berpasir jenuh dan berada dekat dengan garis pantai serta sesar aktif, sehingga memiliki risiko likuefaksi yang signifikan. Ketidakpastian potensi likuefaksi dapat menimbulkan risiko keruntuhan struktur dan kegagalan desain fondasi.

Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan potensi terjadinya likuefaksi pada tanah berpasir di lokasi proyek pabrik Manyar, Gresik, Jawa Timur, sebagai dasar pertimbangan mitigasi risiko dalam perencanaan fondasi dan struktur bangunan di atasnya. Analisis dilakukan dengan metode CSR-CRR berdasarkan data uji Standard Penetration Test (SPT) dan downhole seismic, serta menggunakan metode Ishihara (1979), Yoshimi & Tokimatsu (1984), dan Boulanger & Idriss (2014) untuk penentuan nilai CRR.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi potensi likuefaksi pada proyek pembangunan pabrik yang berlokasi di Manyar, Gresik, Jawa Timur. Metode penelitian terdiri dari tahap pengumpulan data dan analisis data.

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang diperoleh dari laporan penyelidikan tanah (soil investigation) dan hasil uji *downhole seismic* pada lokasi proyek. Data uji tanah meliputi hasil Standard Penetration Test (SPT) pada beberapa titik bor, sedangkan data seismik mencakup kecepatan gelombang tekan (V_p) dan gelombang geser (V_s) pada kedalaman tertentu. Selain itu, digunakan peta gempa terbaru berdasarkan SNI 1726:2019 untuk memperoleh nilai percepatan gempa rencana di lokasi.

Penelitian ini bertujuan menentukan potensi likuefaksi di lokasi proyek sebagai dasar mitigasi risiko kegagalan struktur akibat gempa. Ruang lingkup penelitian meliputi analisis potensi likuefaksi berdasarkan data uji SPT, uji laboratorium, dan *downhole seismic*. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan beban gempa (CSR) dengan ketahanan tanah terhadap likuefaksi (CRR) sehingga diperoleh Faktor Keamanan terhadap Likuefaksi (FS_L). Jika $FS_L < 1$ maka likuefaksi dapat terjadi, dan jika $FS_L > 1$ maka tidak terjadi likuefaksi (Day, 2002).

$$FS_L = \frac{CRR}{CSR} \quad (1)$$

dengan CRR = Cyclic Resistance Ratio, CSR = Cyclic Stress Ratio.

Metode analisis potensi likuefaksi dilakukan melalui tahapan berikut:

1. Perhitungan nilai Cyclic Stress Ratio (CSR)

CSR dihitung menggunakan rumus Seed dan Idriss (1971) yang mempertimbangkan percepatan horizontal maksimum (a_{max}), faktor reduksi tegangan geser (r_d), tegangan vertikal total (σ_{v0}), dan tegangan vertikal efektif (σ'_{v0}). Nilai r_d ditentukan berdasarkan kedalaman tanah dengan persamaan empiris yang tersedia.

Metode untuk menentukan nilai CSR (Seed dan Idriss, 1971) adalah sebagai berikut,

$$CSR = \frac{\tau_{cyc}}{\sigma'_{v0}} = 0,65 r_d \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \quad (2)$$

dengan CSR = Cyclic Stress Ratio, a_{max} = Percepatan Horizontal Maksimum, g = Percepatan Gravitasi, σ_{v0} = Tegangan vertikal total, ton/m^2 , σ'_{v0} = Tegangan vertikal efektif, ton/m^2 , dan r_d = Faktor reduksi tegangan geser.

$$r_d = \exp(\alpha(z) + \beta(z) M) \quad (3)$$

$$\alpha(z) = -1,012 - 1,126 \sin \left(\frac{z}{11,73} + 5,133 \right) \quad (4)$$

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

dengan z = Kedalaman, m , M = Magnitudo gempa

2. Penentuan nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR)

Nilai CRR dihitung menggunakan tiga metode yaitu:

Metode Ishihara (1979) yang berdasarkan nilai SPT terkoreksi terhadap kedalaman dan % kehalusan tanah.

$$\left(\frac{\tau}{\sigma'_0}\right) = 0,009(N_1 + 13 + 6,5 \log C) \quad (6)$$

$$N_1 = \frac{1,7N}{\sigma'_0(kg/cm^2) + 0,7} \quad (7)$$

dengan C = % kehalusan, τ = Kuat geser tak terdrainase, kg/cm^2 , σ'_0 = Tegangan vertikal efektif, kg/cm^2 , N_1 = Nilai SPT terkoreksi terhadap kedalaman, dan N = Nilai N SPT.

Metode Yoshimi & Tokimatsu (1984) yang mempertimbangkan nilai SPT terkoreksi, fungsi derajat kepadatan relatif (Dr), dan parameter regangan geser.

$$\left(\frac{\tau_1}{\sigma'_0}\right) = a \cdot C_r \left[\frac{16\sqrt{N_a}}{100} + \left(\frac{16\sqrt{N_a}}{C_s}\right)^{14} \right] \quad (8)$$

dengan τ_1 = kuat geser tak terdrainase, kg/cm^2 , σ'_0 = Tegangan vertikal efektif, kg/cm^2 , $a = 0,45$, $C_r = 0,57$ (Fungsi Dr), C_s = parameter tergantung pada regangan geser (80-90) dan N_a = Nilai N SPT yang disesuaikan.

Metode Boulanger & Idriss (2014) yang mempertimbangkan nilai SPT terkoreksi terhadap kedalaman dan % kehalusan tanah, metode ini memperbarui parameter koreksi berdasarkan data CPT dan SPT terbaru dan menggunakan *correction for overburden stress* yang lebih stabil.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi likuefaksi pada lokasi proyek pabrik di Manyar, Gresik, Jawa Timur. Magnitudo gempa yang digunakan adalah 6,5 dan percepatan gempa = 0,243 g. Analisis dilakukan berdasarkan data hasil Standard Penetration Test (SPT) dan uji *downhole seismic* pada lubang bor B02.

$$CRR_{M=7,5, \sigma'_v=1} = f[(N_1)_{60}, FC] \quad (9)$$

Dengan $(N_1)_{60}$ = nilai N-SPT yang dikoreksi untuk tegangan vertikal efektif dan *finer content* menggunakan faktor koreksi, FC = *Fines Content*.

$$CRR_{M, \sigma'_v} = CRR_{M=7,5, \sigma'_v=1} * MSF * K_\sigma \quad (10)$$

Dengan $\sigma'_v = 1 atm$, MSF = *Magnitude scaling factor*, $K_\sigma = f(\sigma'_v; D_R; FC)$ = faktor tegangan vertikal efektif.

Metode Andrus & Stokoe (2000) yang mempertimbangkan nilai kecepatan gelombang geser V_s terhadap kedalaman dalam perhitungan nilai CRR.

$$CRR_{7,5CS} = 0,022 \left[\frac{(V_{SI})_{CS}}{100} \right]^2 * 2,28 \left[\frac{1}{215 - (V_{SI})_{CS}} - \frac{1}{215} \right] \quad (11)$$

$$K_{CS} = \begin{cases} 1 & (FC \leq 5\%) \\ 1 + (FC - 5)T & (5\% < FC < 35\%) \\ 1 + 30T & (FC > 35\%) \end{cases} \quad (12)$$

$$T = 0,009 - 0,0109 \left(\frac{V_{SI}}{100} \right) + 0,0038(V_{SI}/100)^2 \quad (13)$$

Dengan T = koreksi umur, FC = *Fines Content* (%)

1. Perhitungan Faktor Keamanan terhadap Likuefaksi (FS_L)

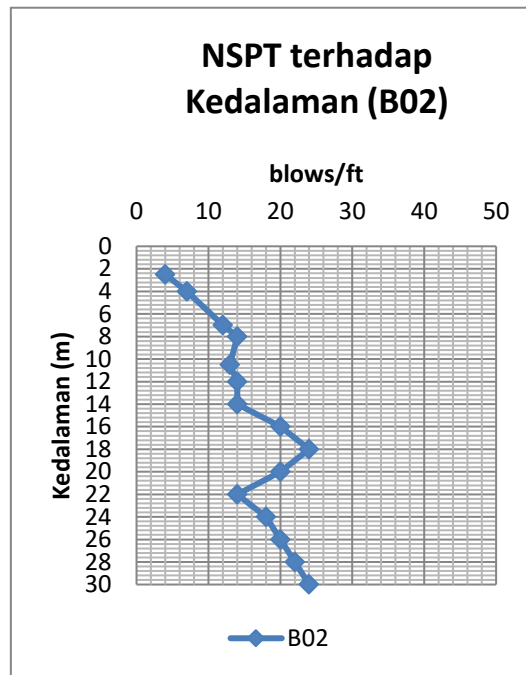
FS_L dihitung dengan membandingkan nilai CRR terhadap CSR pada setiap kedalaman analisis. Jika $FS_L < 1$ maka tanah berpotensi mengalami likuefaksi, sedangkan jika $FS_L > 1$ maka tanah tidak berpotensi likuefaksi (Day, 2002).

2. Klasifikasi tanah berdasarkan SNI 1726:2019

Klasifikasi jenis tanah ditentukan berdasarkan rata-rata nilai NSPT dan kecepatan gelombang geser (V_s) pada lapisan 30 m teratas, untuk menentukan kategori tanah lunak, sedang, atau keras sesuai standar nasional.

Hasil perhitungan dan analisis kemudian dibandingkan dengan nilai standar serta dikaji untuk memberikan rekomendasi teknis terkait mitigasi risiko likuefaksi pada lokasi proyek.

Klasifikasi Tanah Berdasarkan NSPT



Gambar 1. NSPT terhadap kedalaman untuk bor B02

Gambar 1 menunjukkan distribusi nilai NSPT terhadap kedalaman pada lokasi bor B02. Berdasarkan data pada Tabel 1, nilai NSPT rata-rata pada lapisan tanah hingga kedalaman 30 m adalah **12,42**. Nilai ini mengindikasikan tanah di lokasi proyek tergolong **tanah lunak** sesuai klasifikasi SNI 1726:2019.

Tabel 1. N-SPT rata-rata untuk lapisan tanah 30 m teratas

No	Bor	NSPT rata-rata	Status
1	DS01 (B02)	12,42	Tanah Lunak

Hasil ini menunjukkan kepadatan tanah yang relatif rendah sehingga analisis likuefaksi perlu dilakukan dengan cermat.

Kecepatan Gelombang Tekan (V_p) dan Geser (V_s)

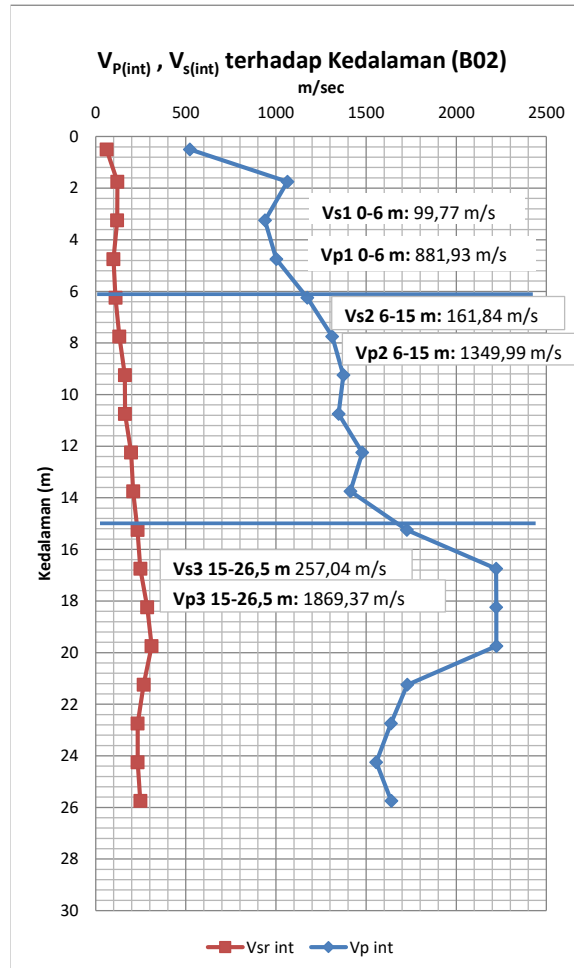
Hasil uji *downhole seismic* menunjukkan kecepatan gelombang tekan (V_p) dan gelombang geser (V_s) pada beberapa kedalaman, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Berdasarkan data pada Tabel 2 dapat dilihat nilai rata-rata V_p dan V_s . Nilai rata-rata V_s pada lubang bor B02 adalah 165,12 m/s, yang termasuk dalam kategori tanah lunak berdasarkan SNI 1726:2019. Hasil ini sama dengan dengan klasifikasi berdasarkan NSPT, sehingga analisis potensi likuefaksi menggunakan kategori gempa untuk tanah lunak.

Tabel 2. V_p dan V_s rata-rata untuk lapisan tanah 30 m teratas

No	Bor	V_p rata-rata (m/s)	V_s rata-rata (m/s)	Status
1	DS01 (B02)	1350,42	165,12	Tanah Lunak

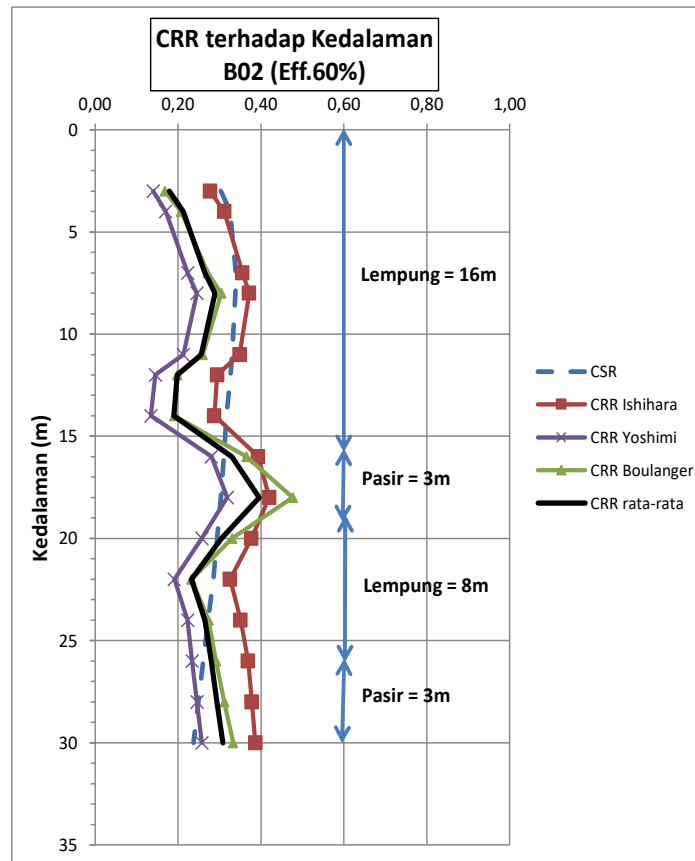
Analisis Cyclic Stress Ratio (CSR) dan Cyclic Resistance Ratio (CRR)

Nilai CSR dihitung menggunakan rumus Seed dan Idriss (1971) yang mempertimbangkan percepatan horizontal maksimum, tegangan vertikal total dan efektif, serta faktor reduksi tegangan geser. Sedangkan nilai CRR dihitung menggunakan metode Ishihara (1979), Yoshimi & Tokimatsu (1984), Boulanger & Idriss (2014) dan Andrus & Stokoe (2000).



Gambar 2. Vp & Vs terhadap kedalaman untuk bor B02

Data pada gambar 2 diatas didapatkan dari pengujian *downhole seismic*. Pada gambar tersebut terdapat plot gelombang tekan (*P Wave*) dan gelombang geser (*S Wave*) terhadap kedalaman. Gelombang tekan ini didapatkan dari rekaman pada *geophone* dalam vertikal, sedangkan gelombang geser ini didapatkan dari rekaman pada *geophone* dalam arah horisontal.



Gambar 3. CRR & CSR terhadap kedalaman untuk bor B02

Berdasarkan grafik pada gambar 3 tersebut, nilai CRR pada setiap kedalaman ada yang lebih kecil dibandingkan nilai CSR. Hal ini menunjukkan ada terdapat potensi likuefaksi pada lapisan tanah pasir di lubang bor B02, karena tanah memiliki ketahanan siklik yang lebih rendah daripada tegangan siklik akibat gempa pada lokasi tersebut (Day, 2002; Kumar et al., 2023).

Pembahasan Hasil

Tabel 3. Pelapisan Tanah versi Borlog SPT dan Grain Size

Kedalaman (m)	Jenis Tanah (Borlog)	Kedalaman (m)	Jenis Tanah (Uji Grain Size)
0-11	Lempung	0-11	Lempung
11-16	Lempung kelanauan	11-16	Pasir
16-19	Lanau berpasir	16-18	Lanau
19-27	Lempung kelanauan	18-24	Lempung
27-30	Lanau berpasir	24-30	Pasir

Berdasarkan data pelapisan tanah pada Tabel 3 diatas terdapat perbedaan pelapisan tanah dari data borlog B02 dan hasil uji *grain size* B02. Adapun data yang digunakan dalam analisa likuefaksi diambil berdasarkan pelapisan tanah dari uji *grain size*.

Tabel 4. *Fine Content* dan D50 pada uji *Grain Size* lubang bor B02

Kedalaman (m)	Fine Content (%)	D50 (mm)
5,00-5,50	63	0,016
11,50-12,00	7	0,63
19,50-20,00	58	0,038
25,50-26,00	80	0,0058
29,50-30,00	2	1,5

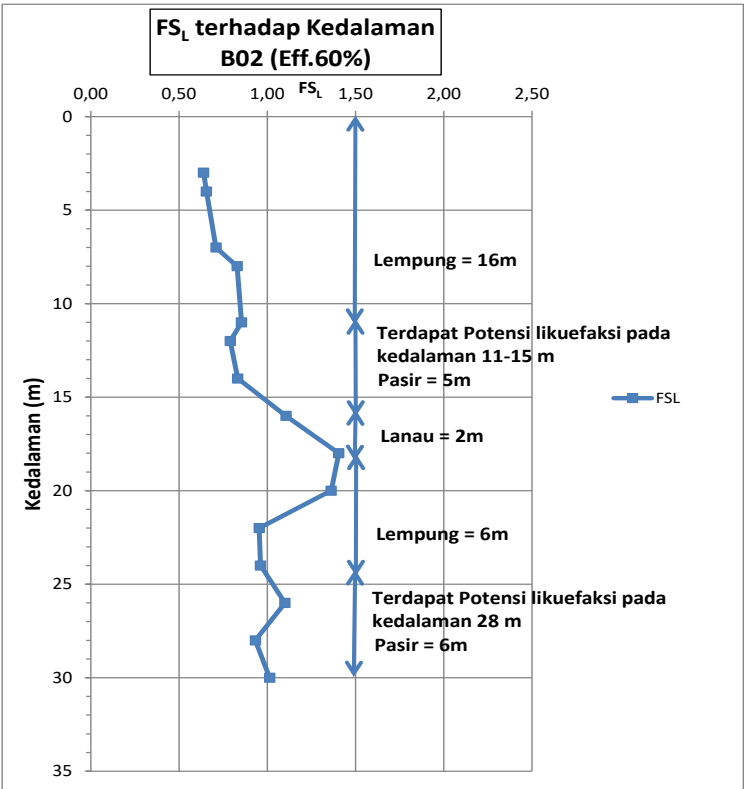
Tabel 4 (Lanjutan). *Fine Content* dan D50 pada uji *Grain Size* lubang bor B02

Kedalaman (m)	Fine Content (%)	D50 (mm)
35,50-36,00	84	0,008
39,50-40,00	81	0,0095
45,50-46,00	88	0,0069
49,50-50,00	86	0,0075

Berdasarkan tabel 4 diatas didapatkan persentase butir halus dan nilai D50 dari uji grain size pada tanah di lubang bor B02.

Tabel 5. CSR, CRR, dan FSL terhadap kedalaman

Kedalaman (m)	<i>Fine Content</i> (%)	CSR	CRR rata-rata	FSL	Jenis Tanah	Likuefaksi
3	63	0,30	0,17	0,64	Lempung	Tidak
4	63	0,33	0,21	0,66	Lempung	Tidak
7	63	0,34	0,27	0,71	Lempung	Tidak
8	63	0,34	0,30	0,83	Lempung	Tidak
11	63	0,33	0,26	0,85	Pasir	Ya
12	7	0,33	0,20	0,79	Pasir	Ya
14	7	0,32	0,19	0,83	Pasir	Ya
16	7	0,31	0,25	1,11	Lanau	Tidak
18	58	0,30	0,48	1,40	Lanau	Tidak
20	58	0,29	0,33	1,36	Lempung	Tidak
22	58	0,29	0,23	0,95	Lempung	Tidak
24	58	0,27	0,27	0,96	Lempung	Tidak
26	80	0,26	0,29	1,10	Pasir	Tidak
28	2	0,25	0,22	0,93	Pasir	Ya
30	2	0,24	0,24	1,01	Pasir	Tidak



Gambar 4. Faktor keamanan F_{SL} terhadap kedalaman untuk bor B02

Berdasarkan data pada Tabel 5 dan Gambar 4 diatas didapatkan untuk hasil pengolahan data lubang bor B02 menunjukkan bahwa pada lapisan tanah lempung 0-11 m dan 22-24 m didapatkan $FS_L < 1$, sedangkan pada lapisan tanah pasir pada kedalaman 11-15 m dan 28 m didapatkan $FS_L < 1$. Dapat disimpulkan bahwa lapisan tanah pasir terdapat potensi likuefaksi pada kedalaman 11-15 m dan 28 m.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis likuefaksi da lokasi proyek pabrik di Manyar, Gresik, Jawa Timur, dapat disimpulkan bahwa:

1. Tanah pada lokasi lubang bor B02 memiliki nilai NSPT rata-rata sebesar 12,42, yang tergolong sebagai tanah lunak berdasarkan klasifikasi SNI 1726:2019.
2. Nilai kecepatan gelombang geser (V_s) rata-rata sebesar 165,12 m/s menunjukkan klasifikasi tanah lunak.
3. Hasil perhitungan *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) menunjukkan bahwa nilai CRR pada lapisan tanah pasir lebih kecil dibandingkan nilai CSR pada kedalaman 11-15 m dan 28 m. Dengan demikian, tidak terdapat potensi likuefaksi pada lapisan tanah pasir di lubang bor B02.
4. Perlu dilakukan perbaikan tanah di lokasi lubang bor B02 atau dilakukan desain fondasi yang sudah mengantisipasi terjadinya likuefaksi pada kedalaman 11-15 m dan 28 m.

Mengingat lokasi proyek berada di dekat sesar aktif, maka disarankan:

1. Untuk melakukan analisis klasifikasi situs secara lebih detail berdasarkan SNI 1726:2019 Bab 6, guna memastikan parameter perencanaan gempa yang digunakan sudah sesuai kondisi lapangan.
2. Jika pada tahap desain struktur terjadi penambahan beban atau perubahan layout bangunan, perlu dilakukan analisis likuefaksi ulang dengan data geoteknik terbaru untuk memastikan keamanan desain fondasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Aytaş, Z., Alpaslan, N., & Özçep, F. (2023). Evaluation of liquefaction potential by standard penetration test and shear wave velocity methods: A case study. *Natural Hazards*, 118, 2377–2417. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06093-9>
- Arif, M., & Zuhlendra, R. (2025). Research Growth in the Topic of Soil Liquefaction between Indonesia and New Zealand: A Bibliometric Analysis from Scopus Database. *Journal of Civil Engineering and Planning (JCEP)*, 6(1), 39-49. <https://journal.uib.ac.id/index.php/jce/article/view/10318>
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *Persyaratan perancangan geoteknik* (SNI 8460:2017). Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung* (SNI 1726:2019). Jakarta: BSN.
- Bol, E., Özocak, A., Sert, S., Çetin, K. Ö., Arslan, E., Kocaman, K., & Ayhan, B. U. (2024). Evaluation of soil liquefaction in the city of Hatay triggered after the February 6, 2023 Kahramanmaraş-Türkiye earthquake sequence. *Engineering Geology*, 339, 107648. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107648>
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2014). *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures* (Report No. UCD/CGM-14). Center for Geotechnical Modeling, University of California.
- Boumpoulis, V., Depountis, N., Pelekis, P., & Sabatakakis, N. (2021). SPT and CPT application for liquefaction evaluation in Greece. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(16), 1631. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08103-1>
- Cetin, K. O., Soylemez, B., Guzel, H., Bakir, B. S., & Ozturk, O. (2025). Soil liquefaction sites following the February 6, 2023, Kahramanmaraş-Türkiye earthquake sequence. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 23, 921–944. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-01875-3>
- Day, R. W. (2002). *Geotechnical earthquake engineering*. McGraw-Hill.
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2010). *SPT-based liquefaction triggering procedures* (Report No. UCD/CGM-10). Center for Geotechnical Modeling, University of California.
- Kumar, D. R., Samui, P., & Burman, A. (2023). Suitability assessment of the best liquefaction analysis procedure based on SPT data. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 6(2), 319–329. <https://doi.org/10.1007/s41939-023-00148-x>
- Laporan Analisis Likuefaksi. (2022). *Laporan proyek likuefaksi Manyar, Gresik, Jawa Timur*.
- Laporan Uji Downhole Seismic. (2022). *Laporan proyek uji downhole seismic Manyar, Gresik, Jawa Timur*.
- Mangunpraja, D. M., & Prihatiningsih, A. (2019). Analisis perbaikan tanah sebagai bentuk mitigasi bencana likuifaksi yang dapat diaplikasikan masyarakat di Palu. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 95-104. <https://doi.org/10.24912/jmts.v2i4.6167>
- Mavroulis, S., Lekkas, E., & Carydis, P. (2021). Liquefaction phenomena induced by the 26 November 2019, Mw=6.4 Durrës (Albania) earthquake and liquefaction susceptibility assessment in the affected area. *Geosciences*, 11(5), 215. <https://doi.org/10.3390/geosciences11050215>

- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(9), 1249–1273.
- Uyanık, O. (2020). Soil liquefaction analysis based on soil and earthquake parameters. *Journal of Applied Geophysics*, 176, 104004. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104004>
- Yueren, X., Guochao, F., Zeyu, L., Guiming, H., Xiaocheng, Z., Feng, S., & Yuan, Y. (2025). Preliminary study on the characteristics of landslides and soil liquefaction triggered by the Tingri M s 6.8 earthquake on January 7, 2025, Southern Tibetan Plateau. *Journal of Earth Science*. <http://en.earth-science.net/en/article/doi/10.1007/s12583-025-0308-0>

