

ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI DAN PENURUNAN TANAH BERDASARKAN PENEMPATAN FONDASI DANGKAL DI KABUPATEN WAKATOBI

Darren Edwad Sutisna¹, Alfred Jonathan Susilo¹, dan Sunarjo Leman¹

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
darren.325210020@stu.untar.ac.id

Masuk: 02-07-2025, revisi: 11-07-2025, diterima untuk diterbitkan: 31-07-2025

ABSTRACT

Liquefaction and soil settlement potential are two major geotechnical risks that must be considered in shallow foundation planning. This study aims to analyze the potential for liquefaction and ground settlement in Wakatobi Regency based on the placement of shallow foundations. The region has geological and seismic characteristics that make it vulnerable to liquefaction, especially in saturated sandy soil layers located near the ground surface. The research methodology includes collecting Standard Penetration Test (SPT) data and laboratory soil testing. Liquefaction zones were also analyzed using methods developed by Seed et al., Youd & Idriss, and Idriss–Boulanger. The analysis results indicate that several zones in Wakatobi have a safety factor against liquefaction below the safe threshold, particularly at depths of 0–5 meters, which are also susceptible to significant settlement when subjected to shallow foundation loads. Technical recommendations include placing shallow foundations on hard soil layers to minimize the risk of structural failure. This research is expected to serve as a reference for safer and more sustainable infrastructure planning in Wakatobi Regency.

Keywords: *Liquefaction, Soil Settlement, Shallow Foundation, Geotechnical, Wakatobi Regency*

ABSTRAK

Potensi likuifaksi dan penurunan tanah merupakan dua resiko geoteknik utama yang perlu dipertimbangkan dalam perencanaan fondasi dangkal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi likuifaksi dan penurunan tanah (*settlement*) di Kabupaten Wakatobi berdasarkan penempatan fondasi dangkal. Wilayah ini memiliki karakteristik geologis dan seismik yang rentan terhadap fenomena likuifaksi, khususnya pada lapisan tanah berpasir jenuh air yang terletak dekat dengan permukaan tanah. Metodologi penelitian meliputi pengumpulan data *Standard Penetration Test* (SPT), dan pengujian laboratorium tanah, zona likuifaksi juga dianalisis menggunakan metode yang dikembangkan oleh Seed et al., Youd & Idriss, and Idriss–Boulanger. Hasil analisis menunjukkan bahwa beberapa zona di Wakatobi memiliki faktor keamanan terhadap likuifaksi di bawah ambang batas aman, terutama pada kedalaman 0–5 meter, yang juga berpotensi mengalami penurunan tanah signifikan jika diberi beban dari fondasi dangkal. Rekomendasi teknis berupa penempatan fondasi dangkal pada lapisan tanah keras untuk meminimalisir resiko terjadinya kegagalan struktur. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam perencanaan infrastruktur yang lebih aman dan berkelanjutan di Kabupaten Wakatobi.

Kata kunci: Likuifaksi, Penurunan Tanah, Fondasi Dangkal, Geoteknik, Kabupaten Wakatobi

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat kerawanan gempa bumi yang tinggi karena berada di zona pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik. Kondisi ini menyebabkan berbagai wilayah di Indonesia, termasuk Kabupaten Wakatobi, memiliki potensi besar terhadap bencana geoteknik seperti likuifaksi dan penurunan tanah (*settlement*). Selain itu, potensi likuifaksi juga berkaitan erat dengan percepatan puncak tanah pada gempa signifikan sebagaimana dijelaskan oleh Hasibuan dan Hasibuan (2020). Fenomena likuifaksi terjadi ketika tanah jenuh air, terutama yang bertekstur pasir lepas, kehilangan kekuatan dan kekakuannya akibat guncangan seismik, sehingga berubah menjadi seperti cairan. Sementara itu, penurunan tanah mengacu pada turunnya permukaan tanah secara vertikal yang dapat disebabkan oleh beban struktur di atas tanah yang tidak memiliki daya dukung yang memadai.

Kabupaten Wakatobi, yang secara geografis terdiri dari pulau-pulau kecil dengan karakteristik tanah lepas dan kondisi geologis yang kompleks, menjadi daerah yang berpotensi tinggi mengalami fenomena tersebut. Hal ini menjadi perhatian penting dalam perencanaan dan pelaksanaan pembangunan infrastruktur, khususnya dalam pemilihan dan penempatan fondasi dangkal. Fondasi dangkal merupakan jenis fondasi yang umum digunakan untuk bangunan skala

kecil hingga menengah karena ekonomis dan mudah dalam pelaksanaannya. Namun, tanpa kajian geoteknik yang tepat, penggunaan fondasi dangkal di daerah yang rawan likuifaksi dan penurunan tanah dapat berujung pada kegagalan struktur. Dalam konteks perencanaan fondasi dangkal, Novianto, Sholeh, dan Anggraini (2022) memberikan pendekatan desain yang relevan dengan kondisi tanah di Indonesia.

Berdasarkan hal-hal di atas, maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Berapakah penurunan yang akan terjadi pada bangunan yang terletak di daerah Kabupaten Wakatobi?
2. Bagaimana cara untuk mengatasi terjadinya likuifaksi jika menggunakan fondasi dangkal?

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis potensi likuifaksi dan penurunan tanah di wilayah Kabupaten Wakatobi berdasarkan data uji lapangan dan laboratorium, serta mengevaluasi tingkat keamanan struktur berdasarkan penempatan fondasi dangkal. Penelitian Alzahrani dan Haque (2023) menekankan pentingnya tindakan mitigasi untuk fondasi dangkal pada tanah yang berpotensi likuifaksi. Dengan mengacu pada data *Standard Penetration Test* (SPT) dan metode analisis yang telah diakui secara internasional seperti metode Seed et al. (1985), Youd & Idriss (2001), serta Idriss–Boulanger (2008), penelitian ini bertujuan memberikan rekomendasi teknis yang tepat untuk mendukung pembangunan infrastruktur yang aman dan berkelanjutan di kawasan tersebut. Penelitian serupa oleh Januar, Alfred, dan Susilo (2022) juga menyoroti pentingnya pengecekan penampang fondasi terhadap fenomena likuifaksi akibat gempa.

Analisis Potensi Likuifaksi

Linverando, Sandjaja, dan Iskandar (2022) melakukan analisis potensi likuifaksi di Jawa Tengah sebagai pembandingan wilayah studi. Likuifaksi merupakan fenomena dimana tanah berbutir atau non-kohefif kehilangan kekuatannya akibat getaran yang disebabkan oleh gempa bumi. Kehilangan kekuatan tersebut disebabkan oleh meningkatnya tegangan air yang menyebabkan tegangan efektif tanah berkurang dan hal ini yang menyebabkan tanah berubah wujud dari padat menjadi cair seperti aliran air. Faktor yang mempengaruhi likuifaksi adalah jenis tanah, kepadatan relatif tanah, tekanan pembatas awal, intensitas dan guncangan gempa, nilai OCR, dan kondisi muka air tanah. Analisis akan dilakukan menggunakan data SPT menggunakan metode sebagai berikut.

1. Metode Seed et al. (1985)

Metode ini memanfaatkan nilai CSR dan CRR yang dihitung berdasarkan parameter seperti kekuatan gempa, percepatan maksimum tanah, persentase kandungan butiran halus, serta tegangan efektif pada tanah. Berikut disajikan metode perhitungan analisis likuifaksi pada persamaan (1) hingga persamaan (4).

$$CRR = MSF \times CRR_{7,5} \quad (1)$$

$$CSR = 0,65 \times \frac{a_{\max} \times \sigma_v}{g \times \sigma'_v} \times r_d \quad (2)$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (3)$$

$$CRR_{7,5} = \frac{0,048 + (-4,721 \times 10^{-3}) \times ((N_1)_{60CS}) + 6,136 \times 10^{-4} + (-1,673 \times 10^{-5})}{1 - 0,1248 \times ((N_1)_{60CS}) + 9,578 \times 10^{-3} \times ((N_1)_{60CS})^2 - 3,258 \times 10^{-4} \times ((N_1)_{60CS})^3 + 3,714 \times 10^{-6} \times ((N_1)_{60CS})^4} \quad (4)$$

Dengan $a_{\max}$ = percepatan maksimum tanah (m/s^2), σ'_v = tegangan efektif lapisan tanah (kPa), σ_v = tegangan total lapisan tanah (kPa), $(N_1)_{60CS}$ = nilai N-SPT koreksi berdasarkan FC, CSR = *cyclic stress ratio*, CRR = *cyclic resistance ratio*, $CRR_{7,5}$ = *cyclic resistance ratio* pada magnitudo gempa 7,5, MSF = *scale factor* magnitudo gempa, r_d = faktor reduksi tegangan (m), g = percepatan gravitasi (m/s^2).

2. Metode Youd-Idriss (2001)

Pendekatan ini memanfaatkan nilai r_d (*depth reduction factor*) yang disesuaikan dengan kedalaman lapisan tanah. Nilai CRR dihitung berdasarkan hasil SPT yang telah dikoreksi dengan mempertimbangkan nilai FC.

Berikut disajikan metode perhitungan analisis likuifaksi pada persamaan (5) hingga persamaan (8).

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

$$CSR = 0,65 \times \frac{a_{\max} \times \sigma_v}{g \times \sigma'_v} \times r_d \quad (6)$$

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

$$CRR_{7,5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60CS}} + \frac{(N_1)_{60CS}}{135} + \frac{50}{[10 \times ((N_1)_{60CS}) + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (8)$$

Dengan $a_{\max}$ = percepatan maksimum tanah (m/s^2), σ'_v = tegangan efektif lapisan tanah (kPa), σ_v = tegangan total lapisan tanah (kPa), $(N_1)_{60CS}$ = nilai N-SPT koreksi berdasarkan FC, CSR = *cyclic stress ratio*, CRR = *cyclic resistance ratio*, $CRR_{7,5}$ = *cyclic resistance ratio* pada magnitude gempa 7,5, MSF = *scale factor* magnitude gempa, r_d = faktor reduksi tegangan (m), g = percepatan gravitasi (m/s^2).

3. Metode Idriss – Boulanger (2008)

Metode ini termasuk dalam kategori metode semi-empiris untuk menganalisis likuifaksi yang disebabkan oleh gempa bumi. Dalam penerapannya, metode ini memperhitungkan koreksi terhadap tekanan *overburden*. Selain itu, metode ini juga menetapkan sejumlah kriteria khusus untuk menentukan apakah tanah berbutir halus memiliki potensi untuk mengalami likuifaksi atau tidak.

Berikut disajikan metode perhitungan analisis likuifaksi pada persamaan (9) hingga persamaan (11).

$$CRR = e^{\left[\left(\frac{(N_1)_{60CS}}{14,1} \right) + \left(\frac{(N_1)_{60CS}}{126} \right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60CS}}{23,6} \right)^3 - \left(\frac{(N_1)_{60CS}}{25,4} \right)^4 - 2,8 \right]} \quad (9)$$

$$CSR = 0,65 \times r_d \times \frac{a_{\max}}{g} \times \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \times \frac{1}{MSF} \times \frac{1}{K_\sigma} \quad (10)$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (11)$$

Dengan $a_{\max}$ = percepatan maksimum tanah (m/s^2), σ'_v = tegangan efektif lapisan tanah (kPa), σ_v = tegangan total lapisan tanah (kPa), $(N_1)_{60CS}$ = nilai N-SPT koreksi berdasarkan FC, CSR = *cyclic stress ratio*, CRR = *cyclic resistance ratio*, $CRR_{7,5}$ = *cyclic resistance ratio* pada magnitude gempa 7,5, MSF = *scale factor* magnitude gempa, r_d = faktor reduksi tegangan (m), g = percepatan gravitasi (m/s^2).

Analisis perhitungan penurunan elastis tanah

Penurunan elastis (*immediate settlement*) merupakan perubahan bentuk tanah yang muncul seketika setelah beban diberikan pada fondasi. Fenomena ini terjadi karena adanya perubahan regangan elastis di dalam tanah dan umumnya dijumpai pada tanah pasir atau tanah berbutir kasar yang tidak mengalami konsolidasi berarti. Pandey dan Singh (2021) membuktikan bahwa penurunan tanah akibat likuifaksi dapat diminimalkan dengan penempatan fondasi pada lapisan non-likuifaksi. Seperti yang diungkapkan Bowles (1996), "penurunan elastis muncul sebagai dampak langsung dari pembebanan dan dapat diprediksi dengan menerapkan teori elastisitas tanah."

Menurut Das (2017), perencanaan fondasi dangkal harus mempertimbangkan karakteristik tanah dan kondisi muka air tanah untuk menghindari kegagalan struktur akibat penurunan berlebih

Perhitungan penurunan elastis dapat dilakukan dengan menerapkan teori elastisitas, dengan anggapan bahwa tanah bersifat sebagai material elastis seragam. Salah satu rumus yang sering digunakan untuk menghitung penurunan elastis didasarkan pada Teori Boussinesq, yang dirumuskan pada persamaan (12) sebagai berikut:

$$S_i = qB \left(\frac{1 - \nu^2}{E} \right) I_s \quad (12)$$

Dengan S_i = penurunan elastis (m), q = tekanan akibat beban pada fondasi (kN/m^2), B = lebar fondasi (m), ν = *Poisson Ratio*, E = Modulus elastisitas tanah (kN/m^2), I_s = faktor pengaruh bentuk fondasi (bergantung pada geometri fondasi).

2. METODE PENELITIAN

Metode pengumpulan data

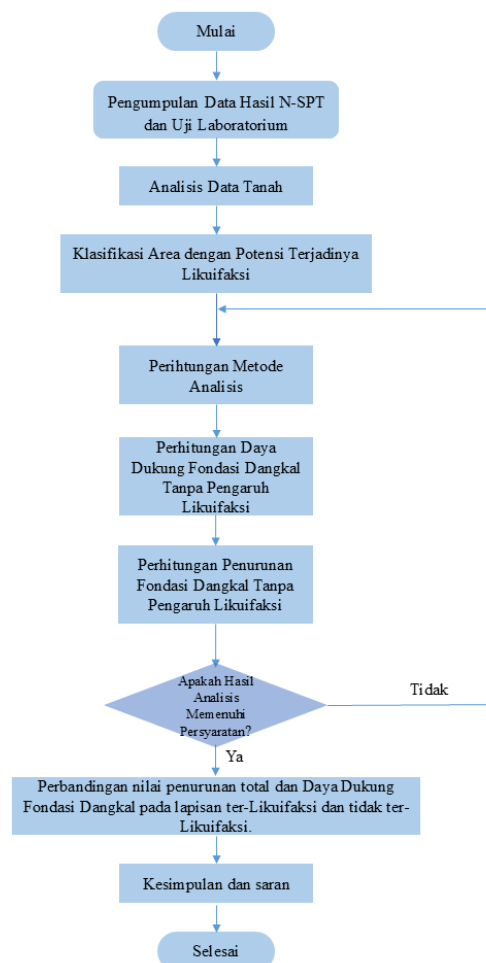
Untuk memperoleh informasi yang diperlukan, dilakukan proses pengumpulan data dari hasil penyelidikan tanah. Data tersebut meliputi hasil data laboratorium, data borelog, serta denah koordinat lokasi titik bor. Seluruh data ini akan diolah lebih lanjut untuk mendapatkan parameter-parameter tanah yang dibutuhkan dalam perhitungan daya dukung dan penurunan tanah.

Metode analisis data

Dalam proses analisis data, digunakan bantuan perangkat lunak seperti Microsoft Excel. Microsoft Excel dimanfaatkan untuk mengolah data hasil data borelog dan membuat *soil profile*. Perhitungan nilai daya dukung serta penurunan tanah juga dilakukan menggunakan bantuan Microsoft excel.

Diagram alir

Adapun diagram alir penelitian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter Tanah

Setelah dilakukan analisis data laboratorium serta data borelog, menghasilkan parameter tanah disajikan dalam Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Tabel parameter tanah

Elevasi (m)		Jenis Tanah	N-SPT	Konsistensi
0	4	<i>Sand</i>	1	<i>Very Loose</i>
4	10	<i>Rock</i>	60	<i>Very Dense</i>
10	15	<i>Rock</i>	60	<i>Very Dense</i>
15	30	<i>Rock</i>	60	<i>Very Dense</i>

Hasil Analisis Penentuan Zona Likuifaksi

Setelah parameter tanah ditentukan maka dapat dilanjutkan ke langkah selanjutnya yaitu analisis penentuan zona likuifaksi menggunakan metode analisis menurut Seed et al (1985), Youd & Idriss (2001), dan Idriss – Boulanger (2008). Serta menggunakan nilai percepatan gempa dengan magnitude sebesar 7,5 Hasil dari perhitungan analisis potensi likuifaksi disajikan dalam Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Tabel penentuan zona likuifaksi

Elevation (m)		SEED ET AL	YOU-D-IDRISS	IDRISS-BOULANGER	LIKUIFAKSI
0	4	FS<1	FS<1	FS<1	YA
4	10	FS>1	FS>1	FS>1	TIDAK
10	15	FS>1	FS>1	FS>1	TIDAK
15	20	FS>1	FS>1	FS>1	TIDAK
20	25	FS>1	FS>1	FS>1	TIDAK
25	30	FS>1	FS>1	FS>1	TIDAK

Perhitungan Daya Dukung dan Penurunan Tanah

Langkah selanjutnya adalah perhitungan daya dukung serta penurunan tanah dari hasil parameter serta penentuan zona likuifaksi yang sudah ada sebelumnya, dalam perhitungan ini akan difokuskan pada elevasi 0-5 m yaitu lapisan ter-likuifaksi sampai lapisan tidak ter-likuifaksi. Analisis daya dukung tanah fondasi dangkal juga pernah dilakukan oleh Muda et al. (2016) berdasarkan data laboratorium. Dalam penelitian ini, perhitungan daya dukung akan menggunakan metode Terzaghi (1943), Meyerhoff, Vesic (1977), dan Hansen (Tabel 3 – Tabel 7).

Tabel 3. Parameter perhitungan daya dukung

Elevation		Type of Soil	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{wet} (kN/m ³)	ϕ'
0	1	SAND	18,8	17,8	18
1	2	SAND	18,8	17,8	18
2	3	SAND	18,8	17,8	18
3	4	SAND	18,8	17,8	18
4	5	ROCK	23,5000	22,5000	45

1. Perhitungan daya dukung fondasi duduk pada lapisan pasir sebelum likuifaksi (kedalaman 2m)

Tabel 4. Hasil perhitungan daya dukung kedalaman 2 m

Elevation		Terzaghi (kN/m ²)	Meyerhof (kN/m ²)	Vesic (kN/m ²)	Hansen (kN/m ²)
0	1	95,178	113,326	102,610	126,624
1	2	95,178	113,326	102,610	126,624
2	3	95,178	113,326	102,610	126,624
3	4	95,178	113,326	102,610	126,624
4	5	5772,916	6913,935	4552,773	6386,630

2. Perhitungan daya dukung fondasi duduk pada lapisan batu sebelum likuifaksi (kedalaman 4 m)

Tabel 5. Hasil perhitungan daya dukung kedalaman 4 m

Elevation		Terzaghi (kN/m ²)	Meyerhof (kN/m ²)	Vesic (kN/m ²)	Hansen (kN/m ²)
0	1	170,879	208,824	177,058	223,406
1	2	170,879	208,824	177,058	223,406
2	3	170,879	208,824	177,058	223,406
3	4	170,879	208,824	177,058	223,406
4	5	8487,636	11978,655	6874,103	9404,359

3. Perhitungan penurunan tanah saat kedalaman 2m

Tabel 6. Hasil perhitungan penurunan kedalaman 2 m

Kolom	q (kN/m ²)	Is	Poisson ratio	B (m)	E (kPa)	se (mm)
1	208,5554	1	0.3	3	12000	47
2	406,425856	1	0.3	3	12000	92
3	208,682811	1	0.3	3	12000	47
4	111,512567	1	0.3	3	12000	25
5	209,674789	1	0.3	3	12000	48
6	112,567767	1	0.3	3	12000	26
7	112,562056	1	0.3	3	12000	26
8	209,813911	1	0.3	3	12000	48
9	112,535489	1	0.3	3	12000	26

4. Perhitungan penurunan tanah kedalaman 4 m

Tabel 7. Hasil perhitungan penurunan kedalaman 4 m

Kolom	q (kN/m ²)	Is	Poisson ratio	B (m)	E (kPa)	se (mm)
1	208,5554	1	0.2	3	79000	8
2	406,4259	1	0.2	3	79000	15
3	208,6828	1	0.2	3	79000	8
4	111,5126	1	0.2	3	79000	4
5	209,6748	1	0.2	3	79000	8
6	112,5678	1	0.2	3	79000	4
7	112,5621	1	0.2	3	79000	4
8	209,8139	1	0.2	3	79000	8
9	112,5355	1	0.2	3	79000	4

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Nilai daya dukung fondasi lebih besar pada kedalaman 4m yaitu saat duduk pada lapisan tanah batu yang tidak ter-likuifaksi dengan nilai daya dukung sebesar 177.058 kN/m² (Metode Vesic) dibandingkan dengan nilai daya dukung pada kedalaman 2m yaitu sebesar 102,610 kN/m² (Metode Vesic).
2. Semakin dalam penempatan fondasi maka semakin kecil nilai penurunan tanah yang terjadi. Pada kedalaman fondasi 4m, nilai penurunan terbesar yang terjadi pada fondasi adalah 15 mm sedangkan saat kedalaman 2m, penurunan tanah yang terjadi mencapai 92 mm.
3. Untuk tetap menggunakan fondasi dangkal serta mencegah terjadinya kegagalan struktur akibat likuifaksi maka fondasi harus duduk pada lapisan tidak ter-likuifaksi

Saran

1. Perlu dilakukan pengecekan secara nyata terhadap Gedung bangunan untuk mendapatkan nilai beban bangunan yang aktual sehingga penelitian dapat lebih akurat .
2. Perlu dilakukan penelitian terhadap beberapa macam variasi jenis tanah dan titik lokasi penelitian sehingga hasil penelitian dapat lebih konkrit.

DAFTAR PUSTAKA

- Alzahrani, A., & Haque, A. (2023). Mitigation measures for shallow foundations on liquefiable soils. *Geotechnical Research*, 10(2), 50–62. <https://doi.org/10.1680/jgere.21.00040>
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Das, B. M. (2017). *Principles of geotechnical engineering* (9th ed.). Cengage Learning.
- Hasibuan, S., & Hasibuan, R. (2020). Probabilitas percepatan puncak tanah pada gempa signifikan dan merusak wilayah NTT. *Prosiding SNITT Poltekba*, 4, 140–150.
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute.
- Januar, K., Alfred, D., & Susilo, J. (2022). Pengecekan penampang fondasi tiang terhadap fenomena likuifaksi akibat gempa. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 5(4).
- Linverando, E., Sandjaja, G., & Iskandar, A. (2022). Analisis potensi likuifaksi Magelang Jawa Tengah. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 5(4), 723–734.
- Muda, A., Kerja, S., Jalan, P., Ii, N., Tengah, K., Besar, B., & Vii, N. (2016). Analisis daya dukung tanah fondasi dangkal berdasarkan data laboratorium. *Jurnal INTEKNA*, 16(1). Online.
- Novianto, D., Sholeh, M., & Anggraini, N. (2022). *Perencanaan fondasi dangkal*. Jawa Timur: Cerdas Ulet Kreatif.
- Pandey, P., & Singh, R. (2021). *Soil settlement analysis of shallow foundation on liquefiable soil*. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(4), 408–418. <https://doi.org/10.1080/19386362.2020.1724472>
- Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., & Chung, R. M. (1985). Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluation. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 111(12), 1425–1445. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:12\(1425\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:12(1425))
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. John Wiley & Sons.

- Vesić, A. A. (1977). *Design of pile foundations*. National Cooperative Highway Research Program Report 129.
- Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 127(4), 817–833. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:4\(817\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:4(817))