



Tersedia Secara Online di  
<http://ojs.unik-kediri.ac.id/index.php/jurmateks/index>  
<https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v6i2.5136>

**JURMATEKS**

## Evaluasi Ketahanan Gempa pada Fondasi Tangki Minyak 3000 bbl Berdasarkan Metode Analitik dan Elemen Hingga

R. Nursani<sup>1</sup>, F. Sarifah<sup>2\*</sup>, Hidayanto<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Siliwangi, Tasikmalaya, Indonesia

Email : <sup>1</sup>[rosinursani@unsil.ac.id](mailto:rosinursani@unsil.ac.id), <sup>2\*</sup>[fitriana.sarifah@unsil.ac.id](mailto:fitriana.sarifah@unsil.ac.id), <sup>3</sup>[hidayanto@unsil.ac.id](mailto:hidayanto@unsil.ac.id).

### ARTICLE INFO

#### Article history :

Artikel masuk : 28 – 10 – 2023  
Artikel revisi : 11 – 12 – 2023  
Artikel diterima : 28 – 12 – 2023

#### Keywords :

Bearing Capacity, Crude Oil Tank Foundations, Earthquake Resilience Evaluation, Stability, Settlements

#### Style IEEE dalam mensitasi artikel ini:

R. Nursani, F. Sarifah, and Hidayanto, "Evaluasi Ketahanan Fondasi Tangki Minyak 3000 bbl Berdasarkan Metode Analitik dan Elemen Hingga," *Jurmateks*, vol.6, no.2, pp. 138-153 2023, doi: 10.30737/jurmateks.v6i2.5136

### ABSTRACT

Oil tank buildings are designed to be earthquake-resistant throughout their lifetime. The foundation of the 3000 bbl petroleum storage tank in Penukal Abab Lematang Ilir (PALI) Regency has been designed using previous seismic standards. This encourages the importance of evaluating foundation resilience against the latest standards because the latest standards show an increase in the Peak Ground Acceleration value. This research aims to determine the Safety Factor (FK) and settlement of the existing foundation of a 3000 bbl petroleum storage tank at the Collecting Station in PALI Regency using earthquake parameters in 2022. A quantitative approach was carried out using finite element and analytical analysis. Steel tank structure design, soil investigation, loads, earthquake parameters, and existing foundation design are used. FK and settlement results will be evaluated based on API 650 and SNI 8604:2017 requirements. The analytical and finite element research results show that the FK value meets the requirements. However, the FK value obtained tends to be too large compared to the requirements. Therefore, it is recommended to design a foundation size smaller than the existing foundation as an efficiency measure. Apart from that, the settlement results at the end of the service life (50th year) show that it is still within the settlement limit permitted by API 650. The research results have confirmed that the existing foundation can withstand earthquakes based on earthquake parameters in 2022. So, these results can be used to develop tank foundation designs for earthquake-safe oil storage in similar locations.

## 1. Pendahuluan

Kegempaan di Kabupaten Penukal Abab Lematang Ilir (PALI) Provinsi Sumatera Selatan terdiri dari zona subduksi dan sesar. Zona subduksi tersebut yaitu Palung Sunda diantaranya Megathrust Mentawai-Siberut sepanjang 300 km dengan  $M_{max}$  8,9 hingga Megathrust Selat Sunda sepanjang 290 km dengan  $M_{max}$  8,7. Zona subduksi tersebut

menampung konvergensi antara lempeng Indo-Australia dan Sunda. Konvergensi ini bertanggung jawab atas tingginya kegempaan di wilayah tersebut. Untuk sesar di wilayah tersebut diantaranya Sesar Barumun dengan pergerakan 6,5 mm/tahun dan  $M_{max}$  7,5 hingga Sesar Semangki Graben dengan pergerakan 6,5 mm/tahun dan  $M_{max}$  6,5. Sesar tersebut mengakomodasi komponen lateral gerak lempeng relatif yang meningkat ke arah barat laut [1].

Salah satu tangki minyak eksisting 3000 bbl di Kabupaten PALI dibangun pada tahun 2015 yang didesain menggunakan beban gempa berdasarkan Peta Gempa Indonesia tahun 2010. Berdasarkan katalog gempa USGS (*United States Geological Survey*), jumlah kejadian gempa besar tercatat selama kurun waktu tahun 1900-2010 di lokasi tangki minyak tersebut yaitu sebanyak 1160 kejadian dengan  $M_w \geq 5$  dan radius sumber gempa ( $R$ ) dalam 500 km. Gempa bumi juga terjadi sebanyak 344 kejadian di lokasi tersebut selama kurun waktu tahun 2010-2023. Riwayat pembaruan Peta Gempa Indonesia setelah tahun 2010 dilakukan pada tahun 2017 dan 2022. Pada tahun 2022, Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN) dan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) telah memperbarui Peta Gempa Indonesia dengan mengeluarkan buku Peta Deagresi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa [2]. Evaluasi ketahanan gempa terutama infrastruktur eksisting, harus berdasarkan Peta Gempa Indonesia tahun 2022. Hal tersebut sangat perlu dilakukan agar kita mengetahui apakah infrastruktur eksisting tersebut masih tahan terhadap gempa berdasarkan peta terbaru. Besarnya beban gempa berdasarkan peta terbaru lebih besar dari peta sebelumnya. Hal tersebut ditunjukkan dengan meningkatnya nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) dari peta sebelumnya.

Tangki penyimpanan minyak merupakan salah satu infrastruktur penting dimana penilaian kerentanan gempa memainkan peran penting dalam kelancaran operasionalnya [3]. Fondasi tangki penyimpanan minyak bumi penting untuk direncanakan dengan baik agar dapat menahan beban gempa yang mungkin terjadi. Perancangan fondasi tangki penyimpanan minyak bumi di atas tanah dengan tepat dapat mengurangi potensi kerusakan akibat gempa [4]. Kinerja fondasi tangki penyimpanan minyak bumi yang baik selama pergerakan tanah yang kuat sangat penting untuk fasilitas modern [5]. Di bawah pengaruh gempa bumi, fondasi tangki penyimpanan minyak bumi berada dalam kondisi *stress* yang kompleks, serta banyak faktor yang mempengaruhinya [6]. Ketika tangki (*unanchored*) dikenakan beban lateral yang disebabkan oleh gempa berfrekuensi tinggi, maka akan timbul momen guling di dasar dinding samping tangki [7].

Sejumlah penelitian telah menyelidiki tentang ketahanan gempa pada tangki penyimpanan minyak bumi dengan fokus pada pelat baja struktur tangki [8]. Selain itu, eksplorasi juga dilakukan pada perilaku fondasi saat terjadi kegagalan karena terjadi penurunan berlebih dan rotasi fondasi dengan pengembangan rasio penyimpangan yang tidak dapat diterima struktur pendukung [9]. Penurunan yang tidak merata dalam desain tangki minyak dapat diterima, selama dapat dikendalikan dalam nilai yang memenuhi batasan yang diperbolehkan [10]. Pada fondasi heterogen yang sama, penurunan maksimum fondasi dan koefisien kritis fondasi meningkat seiring dengan peningkatan intensitas gempa [11]. Intensitas dan durasi getaran gempa yang terjadi merupakan faktor utama yang dapat merusak struktur termasuk fondasi. Adapun maksimum gerakan tanah yang dipertimbangkan adalah 2% kemungkinan terlampaui dalam 50 tahun (masa layan operasi tangki penyimpanan minyak bumi) dengan periode ulang gempa 2500 tahun [12].

Beberapa penelitian telah mengulas tentang ketahanan fondasi saat terjadi gempa. Namun kajian tentang ketahanan fondasi tangki minyak terhadap parameter gempa tahun 2022, khususnya pada tangki penyimpanan minyak bumi 3000 bbl di Kabupaten PALI belum pernah dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai FK dan penurunan fondasi eksisting pada lokasi tersebut. Faktor keamanan (FK) berupa daya dukung, stabilitas terhadap geser dan bahaya guling, serta stabilitas global dari mulai pembangunan hingga akhir masa layan operasi. Hasil analisis akan dievaluasi berdasarkan persyaratan API 650 [12] dan SNI 8604:2017 [13]. Hasil penelitian diharapkan dapat digunakan untuk pengembangan desain fondasi tangki penyimpanan minyak yang aman terhadap gempa di lokasi yang serupa.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini mengadopsi pendekatan kuantitatif dengan analisis elemen hingga dan analitik. Penelitian diawali dengan melakukan pengumpulan data. Setelah itu, evaluasi analitik dilakukan untuk menilai respons struktur fondasi tangki minyak terhadap kombinasi pembebanan gempa. Sedangkan elemen hingga digunakan untuk memvisualisasikan interaksi fondasi terhadap struktur tangki minyak pada kombinasi pembebanan gempa lebih detail.

### 2.1 Pengumpulan Data

Data-data yang dikumpulkan meliputi desain struktur tangki baja, penyelidikan tanah, beban, parameter gempa dan desain fondasi eksisting. Lokasi dan objek penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 1**.



(a)

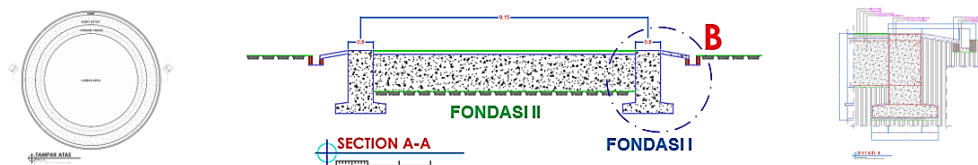


(b)

Sumber: Lokasi (Google Maps, 2023) dan Objek Penelitian (Data Penelitian, 2023).

**Gambar 1.** (a) Lokasi, (b) Objek Penelitian.

### a. Desain Fondasi



Sumber: Objek Penelitian (Autocad, 2015).

**Gambar 2.** (a) Tampak Atas, (b) Potongan A-A, dan (c) Detail B Objek Penelitian.

Pada prinsipnya, fondasi pada **Gambar 2** tersebut adalah satu kesatuan antara Fondasi I dan Fondasi II. Fondasi dibagi menjadi 2 bagian karena beban yang bekerja pada kedua bagian tersebut tidak sama. Selain itu, bentuk dari kedua fondasi tersebut berbeda. Perbedaan tersebut akan menyebabkan nilai daya dukung fondasi yang berbeda. Fondasi I adalah fondasi telapak berbentuk cincin dengan lebar telapak 1,6 m, diameter luar 10,744 m, diameter dalam 9,144 m, tinggi telapak 0,31 m, lebar kolom 0,8 m, dan tinggi kolom 1,7 m dengan mutu beton K-225 dan pembedaan  $\emptyset 13$  mm KSTI ulir-15 cm. Fondasi II merupakan fondasi rakit berbentuk lingkaran dengan diameter 8,344 m dan tinggi 1,2 m serta mempunyai mutu beton K-225 dengan pembedaan  $\emptyset 13$  mm KSTI ulir-20 cm, tinggi urugan pasir 0,1 m, dan tebal lapisan permukaan 2 mm.

### b. Pembebanan

Data beban yang digunakan merupakan beban *ultimate* pada kondisi operasi ditambah efek maksimum gempa meliputi beban mati struktur 167,797 kN, beban fluida 4710,958 kN, tekanan internal 26,630 kN, berat fondasi 1825,899 kN, dan *backfill* 226,902 kN. Pembebanan dalam perhitungan daya dukung *ultimate* yaitu kombinasi dari semua beban tersebut. Pembebanan horizontal/geser akibat gempa untuk perhitungan stabilitas terhadap geser yaitu 208,746 kN. Pembebanan momen akibat gempa dan tekanan internal untuk perhitungan stabilitas terhadap momen guling yaitu 902,995 kN.m.

### c. Penyelidikan Tanah

Data penyelidikan tanah meliputi penyelidikan tanah lapangan (*Standard Penetration Test* atau SPT) dan laboratorium. Penyelidikan tanah laboratorium yang dilakukan yaitu pengujian kadar air *water content* ( $\omega$ ), berat isi (*unit weight/density*) [14], berat jenis / *specific gravity* ( $G_s$ ), batas cair (*liquid limit*), batas plastis (*plastic limit*), uji saringan dan hidrometer (*particle size distribution*), konsolidasi, triaksial *Consolidated Undrained* (CU) [15]. Hasil data SPT dan uji laboratorium terhadap *Undisturbed Sample* (UDS) dapat dilihat pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Hasil Uji Lapangan dan Laboratorium.

Pengolahan Uji Lapangan	Pengolahan Uji Laboratorium
<p>Detailed description of the N-SPT chart: The chart plots N-SPT values against depth in meters. The depth ranges from 0 to 30 meters. The N-SPT values are: 12 at 2.45m, 10 at 4.45m, 18 at 6.45m, 20 at 8.45m, 8 at 10.45m, 10 at 12.43m, 14 at 14.3m, 17 at 16.45m, 11 at 18.45m, 15 at 20.45m, 22 at 22.45m, 20 at 24.45m, and 16 at 26.4m.</p>	<p><b>Untuk Daya Dukung dan Stabilitas terhadap Geser dan Guling</b></p> <p><math>c' = 28,112 \text{ kPa}</math>  <math>\phi' = 4,881^\circ</math>  <math>\gamma_{dry} = 11,448 \text{ kN/m}^3</math> (<math>\omega = 52,48\%</math>)  <math>\gamma_{moist} = 17,456 \text{ kN/m}^3</math>  <math>\gamma_{sat} = 17,605 \text{ kN/m}^3</math> (<math>G_s = 2,67</math>)</p> <p><b>Untuk Penurunan Segera (Silty Clay 1)</b></p> <p><math>\mu_s = 0,5</math>  <math>E_s = 29538 \text{ kPa}</math></p> <p><b>Untuk Penurunan Konsolidasi (Nilai Representatif Lapisan Silty Clay)</b></p> <p><math>e_o = 1,3</math>  <math>\sigma'_c = 131,366 \text{ kPa}</math>; <math>\sigma'_o = 115 \text{ kPa}</math>  <math>C_c = 0,35</math>  <math>C_r = 0,044</math>  <math>H_{dr} = 19 \text{ m}</math>  <math>c_v = 9,629 \text{ m}^2/\text{tahun}</math> (<math>m_v = 3,3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{kN}</math> dan <math>k = 3,18 \times 10^{-5} \text{ m}/\text{tahun}</math>)</p>

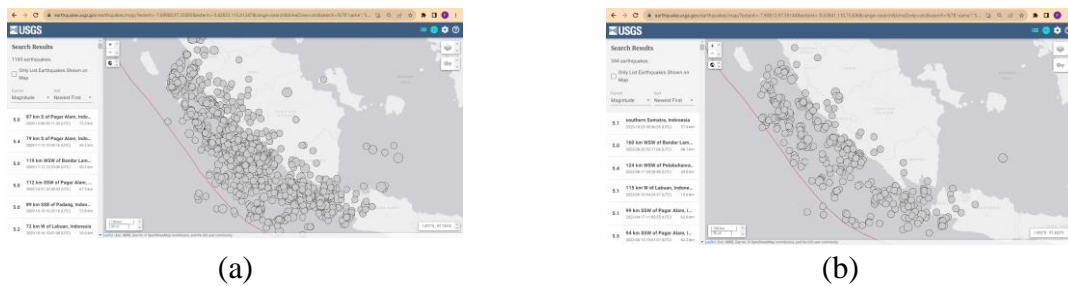
Sumber: Hasil Penelitian (2023).

Nilai parameter tanah tersebut digunakan untuk perhitungan analitik ketahanan fondasi berupa daya dukung *ultimate* terhadap beban aksial, stabilitas terhadap geser, dan stabilitas terhadap bahaya guling yaitu  $\gamma$  (berat isi),  $c$  (kohesi) dan  $\phi$  (sudut geser dalam) [16]. Nilai  $\gamma$  diperoleh dari uji kadar air [17] dan berat isi [14]. Nilai  $c$  dan  $\phi$  diperoleh dari hasil uji triaksial CU. Nilai parameter tanah yang digunakan untuk perhitungan analitik penurunan elastik ( $S_e$ ) yaitu  $\mu_s$  (*poisson ratio* tanah) dan  $E_s$  (modulus elastisitas tanah). Nilai  $\mu_s$  diperoleh dari korelasi parameter dari jenis tanah [18]. Nilai  $E_s$  diperoleh dari korelasi parameter jenis tanah dan hasil uji SPT [19] atau triaksial CU. Klasifikasi jenis tanah berdasarkan *Unified Soil Classification System* (USCS) diperoleh dari hasil uji SPT [19], saringan dan hidrometer [20], batas cair [21], dan batas plastis [22]. Nilai parameter tanah yang digunakan untuk perhitungan analitik penurunan konsolidasi yaitu  $e_o$  (angka pori awal),  $\gamma$  (berat isi),  $C_c$  (indeks kompresi,  $C_r$  (indeks rekompresi),  $\sigma'_c$  (tegangan prekonsolidasi), dan  $c_v$  (koefisien konsolidasi). Nilai  $e_o$  diperoleh dari korelasi parameter  $\gamma$  dan  $G_s$  (berat jenis). Nilai  $G_s$  diperoleh dari hasil uji berat jenis [23].

Nilai  $C_c$ ,  $\sigma'_c$ , dan  $c_v$  diperoleh dari hasil uji konsolidasi [24]. Selain itu, nilai parameter tanah yang digunakan untuk pemodelan metode elemen hingga yaitu  $\gamma$  (berat isi),  $c$  (kohesi) dan  $\phi$  (sudut geser dalam),  $\mu_s$  (*poisson ratio* tanah),  $E_{ref}$  (modulus tanah), dan  $k$  (koefisien permeabilitas). Nilai  $k$  diperoleh dari korelasi parameter dari  $c_v$ ,  $\gamma_w$  (berat isi air), dan  $m_v$  (koefisien kompresibilitas volume). Nilai  $m_v$  diperoleh dari hasil uji konsolidasi [24].

**d. Kejadian Gempa**

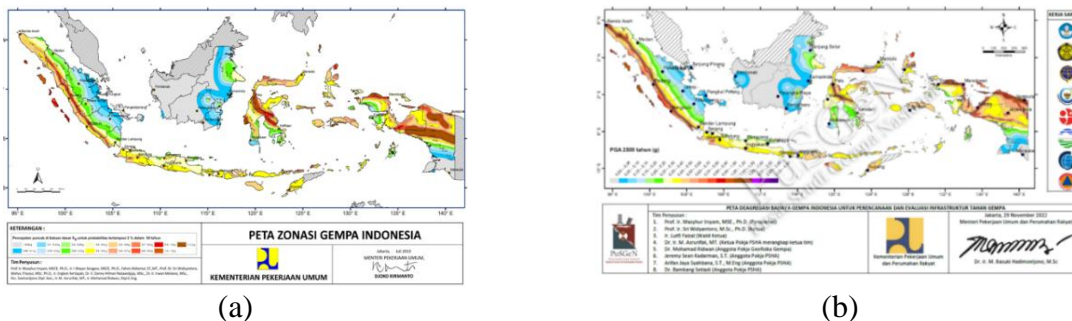
Data kejadian gempa diperoleh dari website *United States Geological Survey* (USGS). Data kejadian gempa yang tercatat pada katalog USGS hanya tersedia dari tahun 1900. Tangki minyak yang dibangun pada tahun 2015 menggunakan beban gempa berdasarkan Peta Gempa Indonesia tahun 2010. Data kejadian gempa besar dalam kurun waktu tahun 1900-2010 yang terjadi di lokasi penelitian mempunyai  $M_w \geq 5$  dan  $R = 500$  km yaitu sebanyak 1160 kejadian gempa (**Gambar 3. (a)**). Padahal setelah tahun 2010 hingga 2023, di lokasi penelitian, kejadian gempa besar telah terjadi peningkatan yaitu sebanyak 344 kejadian (**Gambar 3. (b)**).



Sumber: USGS (2023).

**Gambar 3.** Kejadian Gempa Tercatat pada Koordinat Lokasi Penelitian dengan  $M_w \geq 5$   $R = 500$  km (a) Tahun 1900-2010; (b) Tahun 2010-2023.

Peta Gempa Indonesia tahun 2010 (**Gambar 4. (a)**) menunjukkan bahwa PGA di lokasi penelitian sebesar 0,203 g. Sedangkan, Peta Gempa Indonesia tahun 2022 (**Gambar 4. (b)**) menunjukkan bahwa terdapat peningkatan PGA menjadi 0,2367 g.



Sumber: PuSGeN & Puslitbang PUPR (2010 dan 2022) [25], [2].

**Gambar 4.** Peta Peak Ground Acceleration (PGA) untuk  $T = 2500$  Tahun (a) Tahun 2010; (b) Tahun 2022.

## 2.2 Analisis

### a. Analisis Analitik

Analisis daya dukung tanah fondasi eksisting menggunakan persamaan Meyerhoff [26] [27]. Persamaan Meyerhoff dipilih karena memperhatikan faktor bentuk dan kedalaman fondasi. Daya dukung yang diperoleh digunakan untuk menghitung faktor keamanan fondasi. Faktor Keamanan (FK) merupakan perbandingan  $Q_u$  (daya dukung *ultimate* fondasi dalam kN) terhadap  $Q$  (beban yang bekerja pada fondasi dalam kN) minimum 1,5 untuk kombinasi pembebanan *ultimate* pada kondisi operasi ditambah efek maksimum gempa berdasarkan API 650 [12]. Untuk ketahanan daya dukung fondasi, nilai  $q_u$  (daya dukung *ultimate* fondasi per luas fondasi dalam kPa) harus lebih besar dari  $q$  (tegangan kontak pada dasar fondasi dalam kPa) [28]. FK stabilitas fondasi terhadap geser adalah  $\sum F_R$  (jumlah gaya horizontal yang menahan beban horizontal pada fondasi) terhadap  $\sum H$  (jumlah beban horizontal yang bekerja pada fondasi). Selain itu, FK stabilitas fondasi terhadap momen guling yaitu perbandingan  $\sum M_R$  (jumlah momen akibat beban vertikal pada fondasi yang menahan momen guling pada titik tepi dasar fondasi) terhadap  $\sum M_O$  (jumlah momen guling pada titik tepi dasar fondasi). FK stabilitas fondasi berdasarkan SNI 8460:2017 terhadap momen guling mempunyai nilai  $\geq 2$  dan menahan geser (*sliding resistance*) sebesar  $\geq 1,1$  (gempa) [13]. Pada tanah di bawah fondasi eksisting tangki minyak terjadi penurunan tanah yang terdiri dari penurunan segera/elastik ( $S_e$ ) dan penurunan konsolidasi primer ( $S_c$ ). Penurunan tanah total di bawah fondasi yang diizinkan yaitu sebesar 50 mm [12]. Selain itu, dilakukan juga perhitungan penurunan konsolidasi primer, dan derajat konsolidasi,  $U$  (%) yang terjadi di akhir masa layan operasi tangki.

### b. Analisis Elemen Hingga

Pemodelan fondasi dengan metode elemen hingga dilakukan untuk mengetahui FK stabilitas global dan *total displacement* pada jangka pendek maupun jangka panjang. Jangka pendek yaitu pada saat operasi sesaat setelah pembangunan tangki (kondisi *undrained*) pada tahun 2015. Sedangkan, jangka panjang yaitu pada akhir masa layan operasi (kondisi *drained*) pada tahun 2065 (tahun ke-50). *Displacement* yang diizinkan berdasarkan API 650 [12]  $\leq 50$  mm. Sedangkan, FK stabilitas global berdasarkan SNI 8460:2017  $\geq 1,1$  [13]. Parameter material yang digunakan dalam pemodelan metode elemen hingga ini dapat dilihat pada **Tabel 2**. Validasi pemodelan dilakukan sesuai dengan teori Bjerrum [30] dimana pada awal operasi (jangka pendek), nilai FK fondasi merupakan yang terkecil. Sedangkan FK pada jangka panjang (hingga akhir masa layan operasi) lebih besar dari FK jangka pendek. Untuk validasi *total displacement* pada awal operasi akan dibandingkan dengan penurunan segera dan pada jangka panjang dibandingkan dengan penurunan total hasil perhitungan metode analitik.

**Tabel 2.** Parameter Material pada Pemodelan Metode Elemen Hingga.

Parameter		Foundation	Silty Clay 1	Silty Clay 2	Silty Clay 3	Silty Clay 4	Silty Sand	Satuan
Depth		0.00-2.10	0.00-7.50	7.50-11.50	11.50-15.50	15.50-22.00	22.00-30.00	m
Material model	Model	Mohr-Coulomb	Hardening Soil	Hardening Soil	Hardening Soil	Hardening Soil	Mohr-Coulomb	
Type of material behaviour	Type	Non-Porous	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Drained	
Undrained behaviour method			B	B	B	B		
Soil unit weight below groundwater level	$\gamma_{sat}$		17.605	16.811	17.074	17.240		kN/m <sup>3</sup>
Soil unit weight above groundwater level	$\gamma_{moist}$		17.456	16.769	17.064	17.064	19.865	kN/m <sup>3</sup>
	$\gamma_{dry}$	16.25	12.454	11.278	11.670	11.964	16.250	kN/m <sup>3</sup>
Horizontal permeability	$k_x$		1.096E-07	5.671E-08	7.856E-08	1.119E-07	0.00055	m/day
Vertical permeability	$k_y$		1.096E-07	5.671E-08	7.856E-08	1.119E-07	0.00055	m/day
<b>Stiffness</b>								
Young's modulus	$E_{ref}$	20487000					8204.473	kN/m <sup>2</sup>
Poisson's ratio	$\nu_{(iso)}$	0.2					0.325	
Secant stiffness in standard drained triaxial test	$E_{50,ref}$		3712.517	6210.878	4780.742	7563.299		kN/m <sup>2</sup>
Tangent stiffness for primary oedometer	$E_{oed,ref}$		2970.014	4968.703	3824.593	6050.639		kN/m <sup>2</sup>
Unloading reloading stiffness	$E_{ur,ref}$		11137.552	18632.635	14342.226	22689.896		kN/m <sup>2</sup>
Power	$m$	1	1	1	1	1	1	
<b>Strength</b>								
Cohesion	$c_{ref}$	435.890	62.076	75.511	77.473	91.202	1	kN/m <sup>2</sup>
Friction angle	$\phi$ (phi)	35	0	0	0	0	34	°
Dilatancy angle	$\Psi$ (psi)	0	0	0	0	0	0	°
Interface reduction factor	R	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid	

Sumber: Hasil Penelitian (2023)

### 3. Hasil dan Diskusi

#### 3.1 Hasil Evaluasi Metode Analitik

##### a. Daya Dukung Fondasi

Hasil analisis daya dukung Fondasi I dan II dapat dilihat pada **Tabel 3**. FK daya dukung fondasi eksisting tangki minyak yang diambil adalah nilai FK minimum (terkecil).

**Tabel 3.** Daya Dukung Fondasi Eksisting Tangki Minyak Terhadap Kombinasi Pembebanan Gempa Berdasarkan Metode Analitik.

Tipe	Q (kN)	qu (kPa)	Qu (kN)	q (kPa)	FK
Fondasi I	791,178	429,386	10731,223	31,657	13,564
Fondasi II	6163,528	454,195	24835,975	131,538	4,030

Sumber: Hasil Penelitian (2023).

Berdasarkan hasil perhitungan metode analitik, fondasi eksisting tangki minyak ini mampu menahan beban vertikal yang bekerja pada fondasi akibat kombinasi pembebanan *ultimate* untuk kondisi operasi ditambah efek maksimum gempa. Hal tersebut ditunjukkan pada **Tabel 3** dengan nilai FK fondasi dalam menahan *ultimate bearing failure* untuk kombinasi pembebanan tersebut sebesar 4,030 sebagai FK minimum pada Fondasi II. Nilai tersebut telah memenuhi persyaratan minimum berdasarkan API 650 sebesar 1,5 [12]. Sedangkan nilai FK Fondasi I sangat besar karena mempunyai dimensi yang sangat besar yaitu lebar 1.6 m dan kedalaman 2.1 m.



**Tabel 4.** Stabilitas Fondasi Eksisting Tangki Minyak Terhadap Kombinasi Pembebanan Gempa Berdasarkan Metode Analitik.

Jenis Stabilitas Fondasi	Tahanan	Beban	FK
Terhadap Geser	982,567 kN	208,746 kN	4,707
Terhadap Momen Guling	31793,550 kN.m	902,995 kN.m	35,209

Sumber: Hasil Penelitian (2023).

Fondasi eksisting tangki minyak juga dinyatakan mampu menahan momen guling dan geser yang bekerja pada fondasi akibat kombinasi pembebanan *ultimate* untuk kondisi operasi ditambah efek maksimum gempa. Hal tersebut ditunjukkan pada **Tabel 4** dengan nilai FK stabilitas fondasi terhadap geser sebesar 4,707 lebih besar dari FK minimum yang dipersyaratkan sebesar 1,1 dan nilai FK stabilitas fondasi terhadap momen guling sebesar 35,209 lebih besar dari FK minimum yang dipersyaratkan sebesar 2 berdasarkan SNI 8460:2017 [13]. Nilai FK stabilitas fondasi terhadap momen guling bernilai sangat besar karena fondasi didesain agar momen yang menahan sangat besar terhadap momen guling akibat gempa. Hal tersebut dilakukan karena hal yang paling beresiko ketika gempa adalah rotasi fondasi [9].

#### b. Penurunan Tanah

Penurunan tanah di bawah fondasi dapat dilihat pada **Tabel 5**.

**Tabel 5.** Hasil Penurunan Tanah Berdasarkan Metode Analitik.

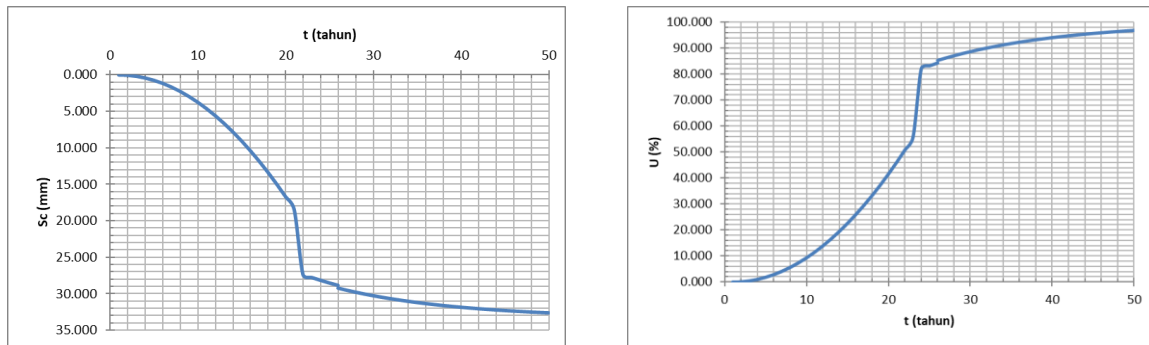
Penurunan Tanah	Nilai (mm)	Beda Penurunan (mm)	Persyaratan
Se (di bawah fondasi - tengah tangki minyak)	14,25	5,13	$\Delta Se(\text{izin}) = \text{bentang tangki minyak yang berbeda penurunan}/300 = 13,9 \text{ mm}$ [13]
Se (di bawah fondasi - ujung tangki minyak)	9,12		
Sc(total)	33,346		
St = Se(max) + Sc(total)	47,596		St(izin) = < 50 mm [12]

Sumber: Hasil Penelitian (2023).

Berdasarkan **Tabel 5**, penurunan tanah di bawah fondasi eksisting dinyatakan aman karena masih kurang dari batas penurunan tanah yang diizinkan. Hal tersebut ditunjukkan dengan nilai penurunan tanah total sebesar 47,596 mm kurang dari batas penurunan total yang diizinkan sebesar 50 mm dan beda penurunan tanah sebesar 5.130 mm kurang dari batas beda penurunan yang diizinkan sebesar 13,9 mm berdasarkan API 650 [12].

Penurunan konsolidasi primer total (Sc) pada lapisan tanah lempung jenuh di bawah fondasi eksisting di kedalaman 3 m – 22 m. Tipe konsolidasi tanah pada penelitian ini adalah OC-NC di mana  $\sigma'_o + \Delta\sigma' > \sigma'_c$ .  $\sigma'_o$  adalah tegangan vertikal efektif,  $\Delta\sigma'$  adalah penambahan tegangan tanah pada titik yang ditinjau akibat beban di atas fondasi berdasarkan pengaruh bentuk beban, ukuran fondasi, dan jarak tinjau terhadap beban, dan  $\sigma'_c$  adalah

tegangan prekonsolidasi. Nilai parameter tanah yang berpengaruh terhadap besarnya nilai penurunan konsolidasi yaitu  $e_o$  (angka pori awal),  $C_c$  (indeks kompresi, dan  $C_r$  (indeks rekompresi). Semakin besar nilai  $C_c$ ,  $C_r$ , dan perbandingan  $(\sigma'_c / \sigma'_o)$  dan  $((\sigma'_o + \Delta\sigma') / \sigma'_c)$  serta semakin kecil nilai  $e_o$  maka nilai penurunan konsolidasi semakin besar. Grafik penurunan konsolidasi tanah di bawah fondasi eksisting tangki minyak,  $S_c$  dan derajat konsolidasi,  $U$  (%) dapat dilihat pada **Gambar 5**.

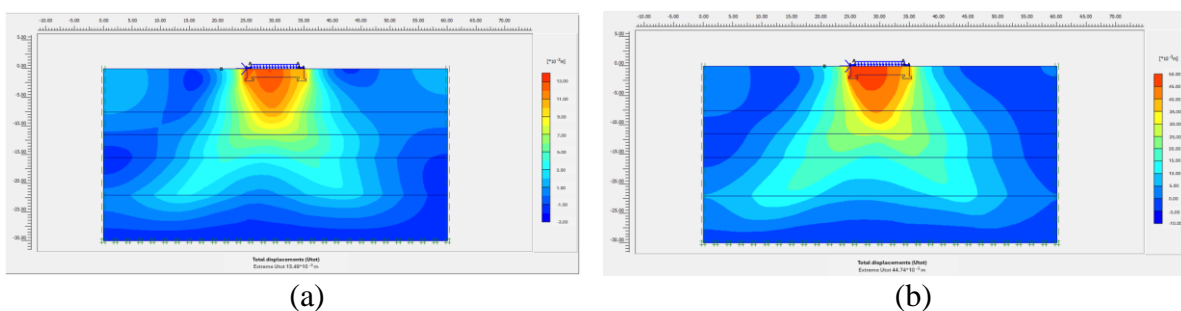


Sumber: Hasil Penelitian (2023).

**Gambar 5.** Penurunan Konsolidasi Primer ( $S_c$ ) dan Derajat Konsolidasi ( $U$ ) terhadap Waktu.

Besaran penurunan konsolidasi primer tanah berbeda tiap waktunya karena derajat konsolidasi yang terjadi tiap waktunya berbeda. Di akhir masa layan tangki yaitu pada tahun ke-50, derajat konsolidasi yang sudah terjadi adalah sebesar 96,984%. Nilai derajat konsolidasi bergantung pada faktor waktu,  $T_v$  (tanpa dimensi). Nilai  $T_v$  dipengaruhi oleh nilai  $c_v$  (koefisien konsolidasi). Nilai  $c_v$  dipengaruhi oleh nilai  $k$  (koefisien permeabilitas). Dari **Gambar 5**. menunjukkan bahwa kecepatan penurunan tanah yang terjadi kurang dari kecepatan penurunan tanah yang diizinkan sebesar 20 mm/tahun [29].

### 3.2 Hasil Evaluasi Metode Elemen Hingga



Sumber: Hasil Penelitian (2023).

**Gambar 6.** Total Displacement (a) Jangka Pendek; (b) Jangka Panjang.

Berdasarkan pemodelan dan analisis metode elemen hingga, fondasi eksisting tangki minyak dinyatakan mampu menahan beban akibat kombinasi pembebanan *ultimate* pada kondisi operasi ditambah efek maksimum gempa. Hal tersebut ditunjukkan nilai FK sebesar

$1,56 \geq 1,1$  pada kondisi *undrained*. Kondisi *undrained* terjadi karena kecepatan penambahan beban melebihi kecepatan terdisipasinya kelebihan air pori. Sedangkan, pada jangka panjang mempunyai kondisi *drained* dengan FK sebesar  $2,03 \geq 1,1$ . Faktor keamanan fondasi yang kritis pada jangka pendek di awal operasi dan semakin aman sampai jangka panjang di akhir masa layan operasi tangki minyak (tahun ke-50) sesuai dengan penelitian terdahulu oleh Bjerrum [30]. Selain itu, *total displacement* yang terjadi pada awal operasi dan pada akhir masa layan operasi tangki minyak adalah sebesar 13,49 mm dan 44,74 mm kurang dari maksimum *displacement* yang diizinkan terjadi sebesar 50 mm berdasarkan API 650 [12].

Validasi model dilakukan dengan mengecek nilai FK dan *total displacement*. Nilai FK jangka panjang lebih besar dari FK jangka pendek. Hal tersebut juga dapat diperhatikan melalui zona merah sebagai zona kritis pada kondisi jangka panjang yang lebih kritis lebih pendek dan lebih kecil dibanding pada kondisi jangka pendek. Selain itu mengacu pada **Tabel 5**, nilai penurunan segera berdasarkan metode analitik sebesar 14,25 mm dan penurunan total sebesar 47,596 mm. Sehingga, didapatkan selisih antara nilai penurunan dan *total displacement* tanah pada jangka pendek yaitu 0,76 mm dan pada jangka panjang sebesar 2,856 mm. Selisih nilai tersebut baik jangka pendek maupun panjang dalam konteks sebagai beda penurunan masih memenuhi dari batas beda penurunan yang diizinkan sebesar 13,9 mm. Berdasarkan hasil tersebut dapat dikatakan pemodelan ini valid.

Pada jangka pendek, kelebihan air pori sebagai respon terhadap beban yang bekerja pada fondasi yaitu sebesar 67,260 kPa. Pada jangka panjang, kelebihan air pori tersebut akan terdisipasi. Hal tersebut menyebabkan nilai FK pada jangka panjang lebih besar karena beban sudah ditahan oleh partikel tanah. FK yang lebih besar mengindikasikan tanah dapat menahan beban yang lebih besar.

### 3.3 Perbandingan Hasil Evaluasi Metode Analitik dan Elemen Hingga

Metode analitik dan elemen hingga saling melengkapi keterbatasan dari masing-masing metode. Metode analitik mempunyai keterbatasan dimana dalam perhitungan FK daya dukung fondasi maupun stabilitas terhadap geser dan momen guling, tidak memperhitungkan waktu analisis pada jangka pendek dan jangka panjang. Sedangkan, keterbatasan metode elemen hingga terletak pada nilai FK yang didapatkan merupakan stabilitas global yaitu kombinasi dari nilai FK. Dengan kata lain FK terhadap geser dan momen guling tidak dapat diketahui dengan pemodelan metode elemen hingga.

Selain itu, kedua metode tersebut juga mempunyai kemiripan. Untuk penurunan tanah pada awal operasi, hasil perhitungan metode analitik dapat dibandingkan dengan metode elemen hingga. Penurunan segera hasil perhitungan metode analitik dapat dibandingkan dengan

*total displacement* pada jangka pendek (awal operasi). Selain itu, penurunan total dapat dibandingkan dengan *total displacement* pada jangka panjang.

### 3.4 Implikasi Hasil Evaluasi

Nilai FK fondasi eksisting tangki minyak pada penelitian ini jauh lebih besar dari persyaratan pada API 650 [12] dan SNI 8460:2017 [13]. Hal tersebut mengindikasikan adanya inefisiensi dalam proses desain. Untuk itu apabila akan dibangun tangki minyak yang sama dengan parameter tanah yang sama, maka direkomendasikan untuk mendesain ukuran fondasi tangki minyak yang lebih kecil dari fondasi eksisting sebagai langkah efisiensi serta juga harus dipastikan bahwa FK dan penurunan tanah di bawah fondasi telah memenuhi persyaratan API 650 [12] dan SNI 8460:2017 [13].

## 4. Kesimpulan

Ketahanan fondasi eksisting tangki penyimpanan minyak bumi 3000 bbl pada Stasiun Pengumpul di Kabupaten Penukal Abab Lematang Ilir terhadap gempa terbaru menunjukkan hasil yang aman. Hal tersebut ditunjukkan melalui pendekatan analitik bahwa nilai Faktor Keamanan (FK) fondasi dalam menahan ultimate bearing failure, terhadap momen guling dan geser telah memenuhi persyaratan SNI 8460:2017 dan API 650. Nilai FK tersebut juga ditemukan melalui pendekatan elemen hingga dengan hasil yang serupa. Semua pendekatan menemukan nilai FK yang cenderung terlalu besar dari persyaratan. Hal tersebut mengindikasikan adanya inefisiensi dalam proses desain. Oleh karena itu direkomendasikan mendesain ukuran fondasi tangki minyak yang lebih kecil dari fondasi eksisting sebagai langkah efisiensi. Selain itu hasil penurunan di akhir masa layan (tahun ke 50) menunjukkan nilai sebesar 47,596 mm melalui pendekatan analitik dan 44,74 mm melalui elemen hingga. Nilai tersebut kurang dari batas penurunan total yang diizinkan oleh API 650 sebesar 50 mm. Hasil penelitian telah menegaskan bahwa fondasi eksisting aman hingga masa layan dengan parameter gempa tahun 2022. Sehingga hasil ini dapat digunakan untuk pengembangan desain fondasi tangki penyimpanan minyak yang aman terhadap gempa di lokasi yang serupa.

## 5. Ucapan Terima Kasih

Penulis berterima kasih kepada pemilik data penelitian yang sudah memberikan data penelitian yang dibutuhkan oleh penulis. Penulis juga berterima kasih kepada Universitas Siliwangi yang sudah memberikan dana penelitian kepada penulis.

**Daftar Pustaka**

- [1] P. P. PusGen, *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Pustlitbang PUPR, 2017. [Daring]. Tersedia pada: <https://simantu.pu.go.id/content/?id=3605>
- [2] Pusat Studi Gempa Nasional, *Buku Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa*. Jakarta: Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan Direktorat Jenderal Cipta Karya Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2022. [Daring]. Tersedia pada: <https://abdimaskwarnas.id/buku-peta-deagregasi-bahaya-gempa-indonesia/>
- [3] K. Kildashti, N. Mirzadeh, dan B. Samali, “Seismic vulnerability assessment of a case study anchored liquid storage tank by considering fixed and flexible base restraints,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 123, no. February, hal. 382–394, 2018, doi: 10.1016/j.tws.2017.11.041.
- [4] R. J. Merino, E. Brunesi, dan R. Nascimbene, “Probabilistic evaluation of earthquake-induced sloshing wave height in above-ground liquid storage tanks,” *Eng. Struct.*, vol. 202, no. January, hal. 1–8, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109870.
- [5] A. Bayraktar, B. Sevim, A. C. Altunişik, dan T. Türker, “Effect of the model updating on the earthquake behavior of steel storage tanks,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 66, no. 3, hal. 462–469, 2010, doi: 10.1016/j.jcsr.2009.10.006.
- [6] W. Jing, J. Shen, X. Cheng, dan W. Yang, “Seismic responses of a liquid storage tank considering structure-soil-structure interaction,” *Structures*, vol. 45, no. November, hal. 2137–2150, 2022, doi: 10.1016/j.istruc.2022.10.003.
- [7] S. Yoshida, “Earthquake Damages and Disaster Prevention of Aboveground Storage Tanks,” *EPI Int. J. Eng.*, vol. 1, no. 2, hal. 87–93, 2018, doi: 10.25042/epi-ije.082018.14.
- [8] F. Syuhada, Z. Djauhari, dan R. Suryanita, “Evaluasi Sisa Umur dan Struktur Tangki Penimbun Berdasarkan Data Percepatan Tanah pada Daerah Rawan Gempa,” *PORTAL J. Tek. Sipil*, vol. 12, no. 2, hal. 48–57, 2020, [Daring]. Tersedia pada: <https://ejurnal.pnl.ac.id/portal/article/view/portal.v12i2.1929/0>
- [9] D. Choudhury *et al.*, “Sustainable foundation solutions for industrial structures under earthquake conditions - theory to practice,” *16th Asian Reg. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. ARC 2019*, 2020, [Daring]. Tersedia pada: [https://www.researchgate.net/publication/336665399\\_Sustainable\\_foundation\\_solutions\\_for\\_industrial\\_structures\\_under\\_earthquake\\_conditions\\_theory\\_to\\_practice](https://www.researchgate.net/publication/336665399_Sustainable_foundation_solutions_for_industrial_structures_under_earthquake_conditions_theory_to_practice)

- [10] S. M. S. Sahraeian, J. Takemura, dan S. Seki, "An investigation about seismic behavior of piled raft foundation for oil storage tanks using centrifuge modelling," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 104, no. January, hal. 210–227, 2018, doi: 10.1016/j.soildyn.2017.10.010.
- [11] Z. Dai, H. Qiao, X. Hao, Y. Wang, H. Lei, dan Z. Cui, "Influence of Heterogeneous Foundation on the Safety of Inverted Cone Bottom Oil Storage Tanks under Earthquakes," vol. 13, no. 7, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings13071720>.
- [12] American Petroleum Institute, *API 650: Welded Tanks for Oil Storage*, 13th ed. American Petroleum Institute, 2020. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.api.org/products-and-services/standards/important-standards-announcements/standard650>
- [13] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Badan Standardisasi Nasional, 2017. [Daring]. Tersedia pada: <https://pesta.bsn.go.id/produk/detail/13506-84602017>
- [14] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-3637-1994 Metode Pengujian Berat Isi Tanah Berbutir Halus dengan Cetakan Benda Uji (Rujukan ASTM D2937-83)*. Badan Standardisasi Nasional, 1994. [Daring]. Tersedia pada: <https://pu.go.id/pustaka/biblio/sni-03-3637-1994-metode-pengujian-berat-isi-tanah-berbutir-halus-dengan-cetakan-benda-uji-rujukan-astm-d2937-83/7D1BJ>
- [15] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 2455:2015 Cara uji triaksial untuk tanah dalam keadaan terkonsolidasi tidak terdrainase (Consolidated Undrained/CU) dan terkonsolidasi terdrainase (Consolidated Drained/CD) (ASTM D4767-88, MOD)*. Badan Standardisasi Nasional, 2015. [Daring]. Tersedia pada: <https://pesta.bsn.go.id/produk/detail/9970-sni24552015>
- [16] F. Sarifah, I. Handiman, dan Z. Gusnadi, "Prinsip Penentuan Kapasitas Dukung Fondasi Dangkal Berdasarkan Metode Analitik Rasional," *Akselerasi J. Ilm. Tek. Sipil*, vol. 4, no. 2, 2023, doi: 10.37058/aks.v4i2.6534.
- [17] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1965:2008 Cara uji penentuan kadar air untuk tanah dan batuan di laboratorium*. Badan Standardisasi Nasional, 2008. [Daring]. Tersedia pada: <https://binamarga.pu.go.id/index.php/nspk/detail/sni-19652019-metode-uji-penentuan-kadar-air-untuk-tanah-dan-batuan-di-laboratorium-sebagai-revisi-dari-standar-nasionai-indonesia-19652008-cara-uji-penentuan-kadar-air-untuk-tanah-dan-batuan-di-laboratorium>

- [18] B. M. Das dan K. Sobhan, *Principles of Geotechnical Engineering*, Eighth Edi. Stamford: Cengage Learning, 2014. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.amazon.com/Braja-Das-Principles-Geotechnical-Engineering/dp/B00N4HZ00M>
- [19] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 4153:2019 Metode uji penetrasi standar (SPT) dan pengambilan contoh tanah dengan tabung belah (ASTM D 1586-11, IDT)*. Badan Standardisasi Nasional, 2019. [Daring]. Tersedia pada: <https://pesta.bsn.go.id/produk/detail/12725-sni41532019>
- [20] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 3423:2008 Cara uji analisis ukuran butir tanah*. Badan Standardisasi Nasional, 2008. [Daring]. Tersedia pada: <https://binamarga.pu.go.id/index.php/nspk/detail/sni-3423-2008-cara-uji-analisis-ukuran-butir-tanah>
- [21] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1967:2008 Cara Uji Penentuan Batas Cair Tanah*. Badan Standardisasi Nasional, 2008. [Daring]. Tersedia pada: <https://binamarga.pu.go.id/uploads/files/593/sni-1967-2008-cara-uji-penentuan-batas-cair-tanah.pdf>
- [22] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1966:2008 Cara Uji Penentuan Batas Plastis dan Indeks Plastisitas Tanah*. Badan Standardisasi Nasional, 2008. [Daring]. Tersedia pada: <https://binamarga.pu.go.id/index.php/nspk/detail/sni-1966-2008-cara-uji-penentuan-batas-plastis-dan-indeks-plastisitas-tanah>
- [23] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1964:2008 Cara Uji Berat Jenis Tanah*. Badan Standardisasi Nasional, 2008. [Daring]. Tersedia pada: <https://binamarga.pu.go.id/index.php/nspk/detail/sni-1964-2008-cara-uji-berat-jenis-tanah>
- [24] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 2812:2011 Cara uji konsolidasi tanah satu dimensi*. Badan Standardisasi Nasional, 2020. [Daring]. Tersedia pada: <https://pesta.bsn.go.id/produk/detail/8909-sni28122011>
- [25] Kementerian PUPR, *Peta Hazard Gempa Indonesia 2010*. Jakarta, 2010. [Daring]. Tersedia pada: <https://pu.go.id/pustaka/biblio/peta-hazard-gempa-indonesia-2010-sebagai-acuan-dasar-perencanaan-dan-perancangan-infrastruktur-tahan-gempa/833L2>
- [26] G. G. Meyerhof, "The ultimate bearing capacity of foundations," *Geotechnique*, vol. 2, no. 4, hal. 301–332, 1951, doi: 10.1680/geot.1951.2.4.301.

- [27] D. Hartanto, Y. Cahyo, dan S. Winarto, “Perencanaan Pondasi Tiang Pancang Pada Gedung Sekretariat Dewan Dprd Kabupaten Kediri,” *J. Manaj. Teknol. Tek. Sipil*, vol. 1, no. 2, hal. 303–312, 2018, doi: 10.30737/jurmateks.v1i2.418.
- [28] Braja M. Das, *Principles of Foundation Engineering*, Eighth Edi. Boston: Cengage Learning, 2014. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.abebooks.com/9781305081550/Principles-Foundation-Engineering-Braja-M-1305081552/plp>
- [29] F. Sarifah dan N. Anggraini, “Prinsip perencanaan continuous improvement program perbaikan tanah lempung lunak menggunakan PVD dengan vacuum preloading untuk jalan berkualitas, estetik, dan ramah lingkungan (studi kasus proyek strategis nasional jalan tol trans Sumatera),” *Konf. Reg. Tek. Jalan*, hal. 19–25, 2022, doi: <https://doi.org/10.58674/phpji.v15i1.49>.
- [30] L. Bjerrum, “Embankments on Soft Ground,” in *Proceeding American Society of Civil Engineers Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported.*, 1972, vol. 1, hal. 1–54. doi: 10.4324/9781315697307-5.