

ANALISIS PERBANDINGAN PENURUNAN TIANG FONDASI PADA LAPISAN LENSA DAN LAPISAN TANAH KERAS

Michelle Lu¹, dan Alfred Jonathan Susilo²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: michelle.325180034@stu.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: alfred@ft.untar.ac.id

Masuk: 19-01-2022, revisi: 14-02-2022, diterima untuk diterbitkan: 22-02-2022

ABSTRACT

The subsidence phenomenon of foundation piles caused by unidentified soil lenses layer. Soil lens is a dense soil layer which the N-SPT value exceeds 50 with the thickness around 1 - 4 m located between soft soil layers which the N-SPT value below 15. The soil lens itself is the outcome of material deposition process due to water flow and erosion activity that accumulates and becomes saturated after long time until a relatively thin layer with similar characteristics as hard soil is formed. Thin soil lenses can break and lead to failure. This study aims to analyze the axial bearing capacity and settlement of driven piles foundations that occupy two end bearing elevation conditions, which takes place on soil lens and the hard soil layer. The bearing capacity is based on a project in Cengkareng, West Jakarta where the thickness of soil lens is around 2,5 m using one bore log report and laboratory report. The method that will be used for this research are Meyerhof and Hanna 1978 and Meyerhof 1956. This research conclude the end bearing capacity of soil lenses is smaller than hard soil layer and settlement of soil lenses layer is bigger than hard soil layer.

keyword: soil lenses, hard soil layer, driven piles, axial bearing capacity, settlement

ABSTRAK

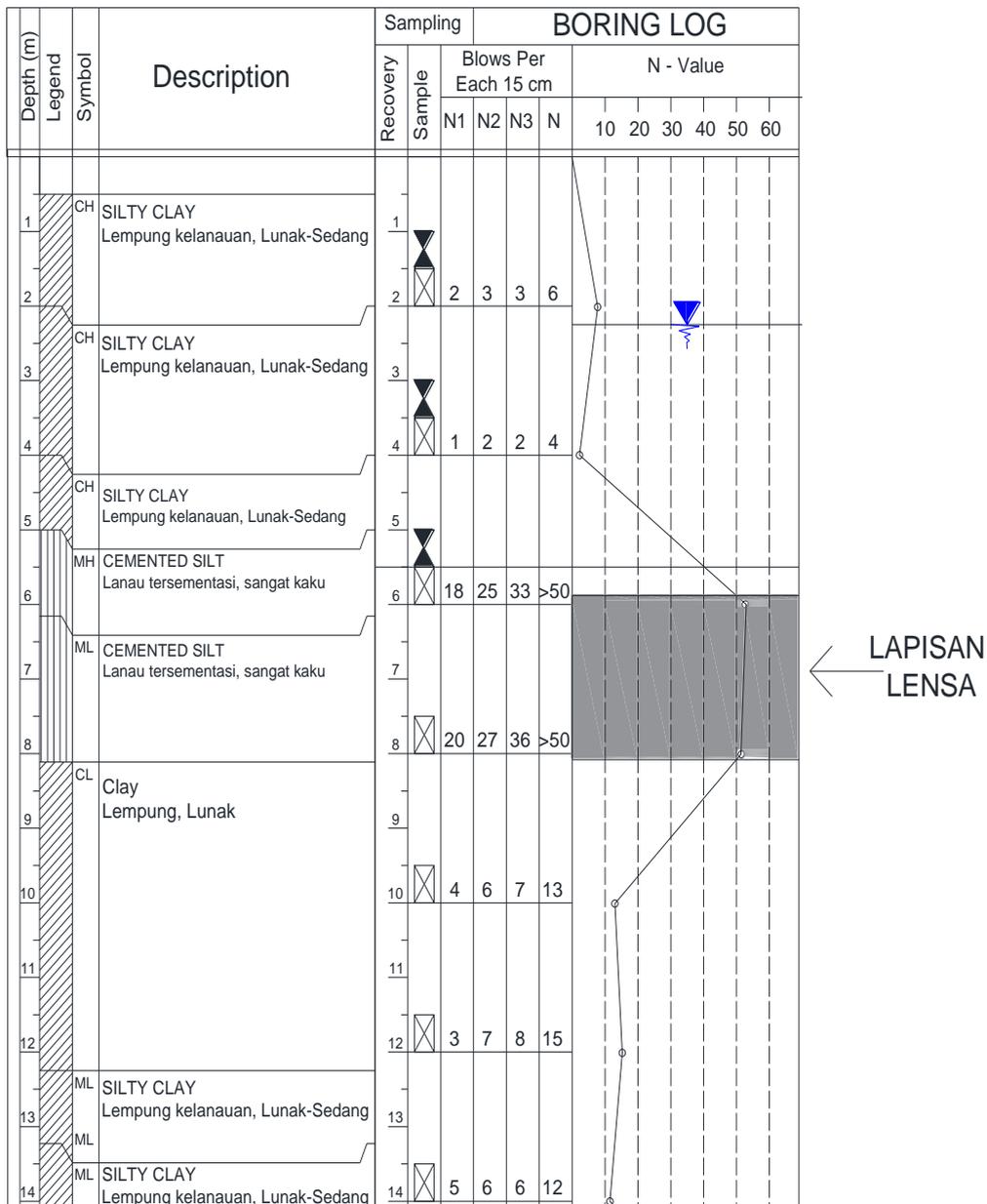
Fenomena penurunan tiang fondasi dapat disebabkan oleh adanya tanah dengan lapisan lensa yang tidak teridentifikasi. Lapisan lensa adalah sebuah lapisan tanah padat dengan nilai N-SPT > 50 dengan ketebalan 1 - 4 m yang terletak di antara lapisan tanah lunak dengan nilai N-SPT < 15. Lapisan lensa merupakan hasil proses pengendapan material dan aktivitas erosi yang menimbun serta menjadi jenuh setelah beberapa lama sehingga terbentuk suatu lapisan yang relatif tipis dan mempunyai karakteristik seperti tanah keras. Lapisan lensa yang terlalu tipis dapat pecah dan menyebabkan kegagalan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis daya dukung aksial dan penurunan fondasi tiang pancang yang menduduki dua kondisi elevasi end bearing, yaitu menduduki lapisan lensa dan lapisan tanah keras. Analisis ditinjau pada suatu proyek di Jakarta Barat dengan ketebalan lapisan lensa 2,5 m dan data tanah yang digunakan berupa data boring log dan laboratorium. Metode yang digunakan dalam perhitungan daya dukung ujung adalah metode punching shear dari Meyerhof dan Hanna untuk tanah dengan lapisan lensa dan metode N-SPT dari Meyerhof untuk tanah keras dan daya dukung selimut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya dukung ujung pada lapisan lensa lebih kecil daripada lapisan tanah keras, dan penurunan tiang pada lapisan lensa lebih besar daripada lapisan tanah keras.

kata kunci: lapisan lensa, lapisan tanah keras, tiang pancang, daya dukung aksial, penurunan fondasi

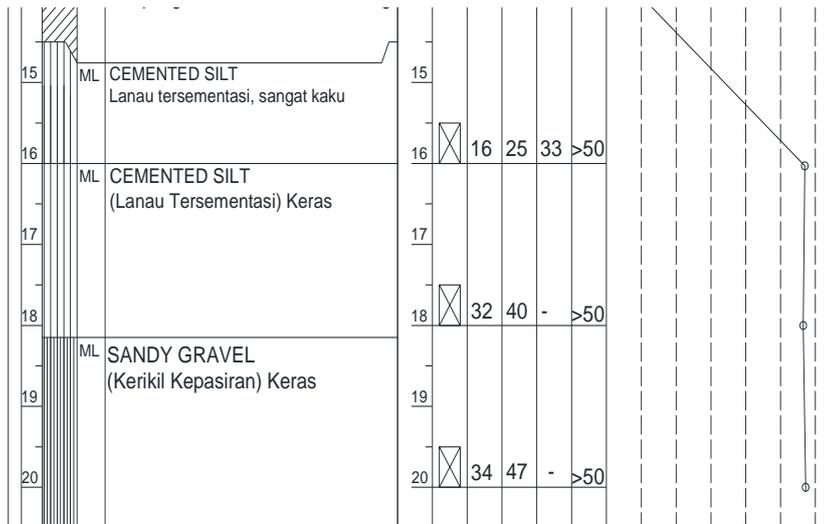
1. PENDAHULUAN

Dalam perencanaan desain bangunan, penyelidikan tanah harus dilakukan terlebih dahulu untuk mengetahui kekuatan atau daya dukung tanah, posisi kedalaman lapisan tanah keras, dan *properties* tanah sebagai pedoman pekerjaan desain struktur fondasi agar konstruksi di atasnya dapat ditahan sepenuhnya. Salah satu penyelidikan yang umum digunakan adalah *cone penetration test* (CPT) atau yang biasanya disebut dengan uji sondir. Akan tetapi, terdapat suatu lapisan yang tidak dapat ditembus oleh *Cone penetration test* (CPT), lapisan tersebut dinamakan lapisan lensa. Hal tersebut terjadi karena *Cone penetration test* (CPT) tidak dapat menembus lapisan tanah yang tebal dengan nilai uji SPT lebih besar dari 30 dan menahan nilai kapasitas maksimum sebesar 2,5 tonf. Apabila sudah lebih dari 2,5 tonf, konus atau ujung alat penetrasi yang berbentuk kerucut sudah tidak dapat melakukan penetrasi lagi sehingga penyelidikan ini tidak dapat mendeteksi lapisan tanah lunak yang terdapat di bawah lapisan lensa. Dengan demikian, lapisan lensa yang mempunyai kapasitas lebih kecil dari 2,5 tonf dapat dideteksi oleh *Cone penetration test* (CPT).

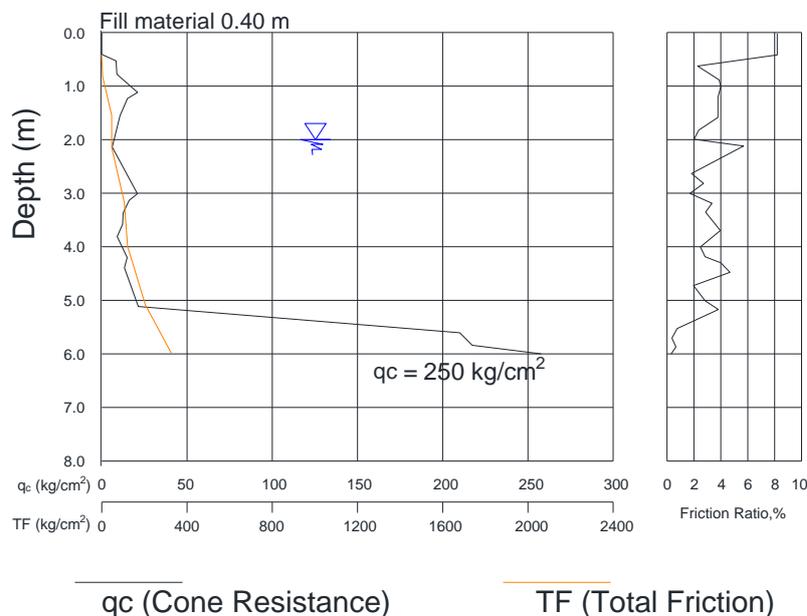
Lapisan lensa mempunyai karakteristik kuat geser yang lebih besar jika dibandingkan dengan lapisan tanah yang berada di atas maupun di bawahnya (Setiyowati & Arifin, 2018). Hal ini membuat banyak perencana yang menganggap bahwa lapisan lensa sudah merupakan lapisan tanah keras dan mengambil lapisan lensa sebagai penahan lapisan fondasi tiang. Lapisan lensa pasir dan lempung berada di antara lempung atau lanau jenuh merupakan hasil proses fluviatile (Hendrayana & Ramadhika, 2016). Proses fluviatile adalah seluruh proses geologis yang membentuk lapisan alluvial. Lapisan ini terbentuk akibat adanya aliran air dari angkutan endapan sedimentasi dan aktivitas erosi yang menimbun, mengendap, dan menjadi jenuh setelah waktu yang lama pada daerah yang lebih rendah sehingga terbentuk suatu lapisan yang relatif tipis dan memiliki karakteristik seperti tanah keras yang kemudian disebut lapisan lensa. Lapisan alluvial yang biasanya terbentuk dan tersebar dengan butiran yang sangat beragam, dari berbutir halus, sedang, sampai berbutir kasar.



Gambar 1. Data N-SPT



Gambar 2 Lanjutan data N-SPT



Gambar 3 Data sondir

Dari Gambar 1 di atas, ditunjukkan bahwa pada kedalaman 0 – 6 m merupakan tanah lunak dimana NSPT < 15, kedalaman 6 – 8 m merupakan tanah keras dimana NSPT > 50, kedalaman 8 – 16 m merupakan tanah lunak lagi dimana NSPT < 15 dan pada Gambar 2, kedalaman 16 m sampai ke bawah sudah tanah keras dengan NSPT > 50. Dapat diartikan bahwa pada kedalaman 6 – 8 m merupakan tanah lapisan lensa yang mempunyai nilai uji SPT lebih besar dari 50 karena terletak di antara lapisan tanah lunak. Sedangkan pada Gambar 3, sondir berhenti pada kedalaman 6 m dimana tidak dapat menembus lapisan lensa.

Bentuk dan ukuran lapisan lensa bervariasi dan sulit dideteksi jika hanya dengan uji sondir atau *cone penetration test* (CPT). Ketebalan lensa pasir dapat diukur lebih akurat pada titik-titik fondasi dengan uji SPT (*Standard Penetration Test*) atau boring. Lapisan lensa harus memiliki ketebalan tertentu agar mendapatkan struktur fondasi yang kuat sehingga struktur di atasnya akan aman, di mana biasanya lapisan lensa mempunyai ketebalan 1 - 4 m. Ketebalan lensa juga akan mempengaruhi penurunan dan tegangan geser yang terjadi dimana kedua faktor tersebut harus memenuhi syarat yang telah ditentukan.

Lapisan lensa yang terlalu tipis dapat pecah dan menyebabkan kegagalan pada bangunan. Terdapat salah satu kasus pembangunan proyek Jembatan Kelayan yang awalnya mendapatkan hasil uji lapisan tanah keras pada kedalaman 40

m. Namun pada saat pemancangan tiang, didapatkan lapisan tanah keras yang sebenarnya ada pada kedalaman 58 m. Hal tersebut dapat terjadi karena lapisan lensa pasir yang awal dianggap lapisan tanah keras tersebut pecah sehingga semua tiang harus dipancang sampai dengan kedalaman lapisan tanah keras sebenarnya. (Setiyowati & Arifin, 2018). Tanah lapisan lensa mengakibatkan bangunan mengalami *settlement* yang cukup besar dalam jangka waktu singkat sehingga akan mengurangi tingkat keamanan dan umur bangunan. (Sutjiamidjaja, 2017).

Oleh karena itu tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui besar kapasitas daya dukung aksial dan penurunan yang terjadi pada dua jenis elevasi *end bearing* yang telah ditentukan, mengetahui jenis penurunan yang lebih dominan, dan pemilihan fondasi yang tepat apabila ditemukan lensa. Manfaat dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh tanah dengan lapisan lensa yang memiliki risiko penurunan yang sangat besar. Dengan penelitian ini, diharapkan dalam perencanaan fondasi bangunan untuk menghitung kapasitas daya dukung yang dapat dipikul dan penurunan tiang yang terjadi dengan menyesuaikan fungsi bangunan dan tinggi bangunan agar tidak mengurangi tingkat keamanan dan umur bangunan.

Lapisan lensa

Lapisan lensa adalah suatu lapisan tanah padat dan keras dengan N-SPT > 50 yang berada di antara lapisan tanah lunak dengan N-SPT < 15. Lapisan lensa mempunyai ketebalan yang bervariasi dan dapat bersifat setempat ataupun meluas serta sering dijumpai di Indonesia. Lapisan lensa dapat berupa jenis pasir dan lempung. Dengan adanya keberadaan lapisan lensa ini dapat menghasilkan *differential settlement* yang cukup besar (Imanzadeh, Denis, & Marache, 2014).

Daya dukung metode punching shear

Apabila fondasi terletak di atas tanah dengan lapisan lensa, maka penentuan daya dukung batas akan menggunakan metode Mayerhof dan Hanna (1978). Dengan adanya tanah dengan lapisan lensa, maka keruntuhan dalam tanah akan coblos (*punching*) dalam lapisan tanah yang padat yang kemudian akan terjadi keruntuhan geser menyeluruh dalam lapisan tanah lunak. Berikut merupakan rumus dengan kondisi lapisan tanah padat merupakan tanah pasir dan di bawahnya merupakan lapisan tanah lempung lunak:

$$Q_{bottom} = \left(1 + \frac{0.2B}{L}\right) 5.14 C_2 + \gamma_1 (D_f + H) \quad (1)$$

$$Q_{top} = \gamma_1 D_f N_{q(1)} F_{qs(1)} + \frac{1}{2} \gamma_1 B N_{\gamma(1)} F_{\gamma s(1)} \quad (2)$$

$$Q_u = \left(1 + \frac{0.2B}{L}\right) 5.14 C_2 + \gamma_1 H^2 \left(1 + \frac{B}{L}\right) \left(1 + \frac{2D_f}{H}\right) \left(\frac{K_s \tan(\phi_1)}{B}\right) + \gamma_1 D_f \quad (3)$$

Keterangan:

- B : lebar fondasi
- L : panjang fondasi
- C_2 : kohesi lapisan tanah bawah
- γ_1 : berat volume lapisan tanah atas
- D_f : kedalaman fondasi (m)
- H : tebal lapisan tanah atas (m)
- $N_{q(1)}$: faktor daya dukung lapisan tanah atas untuk sudut geser tanah ϕ_1
- $F_{qs(1)}$: faktor bentuk
- $N_{\gamma(1)}$: faktor daya dukung lapisan tanah atas untuk sudut geser tanah ϕ_1
- $F_{\gamma s(1)}$: faktor bentuk
- K_s : koefisien geser coblos (*punching shear coefficient*)
- ϕ_1 : sudut geser lapisan tanah atas ($^\circ$)

Daya dukung metode N-SPT

Penentuan daya dukung tanah pada fondasi tiang pancang dapat dihitung dengan metode N-SPT dari Meyerhof. Meyerhof (1956) merumuskan daya dukung ujung tiang pancang dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_p = 40 N_b A_p \quad (4)$$

Sedangkan untuk daya dukung selimut tiang pancang dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_s = 0.2 N_s A_s \quad (5)$$

Keterangan:

N_b : nilai N-SPT rata-rata di dekat ujung tiang: 8B ke atas dan 3B ke bawah ujung tiang

A_p : luas penampang dasar tiang (m^2)

N_s : nilai N-SPT ujung tiang

A_s : luas selimut tiang (m^2)

Penurunan elastis

Penurunan elastis atau *immediate settlement* terjadi sesaat setelah beban bekerja yang menyebabkan deformasi elastis pada tanah tanpa adanya perubahan kadar air. Penurunan elastis pada satu tiang dibagi menjadi tiga komponen, yaitu:

1. Pemendekan elastis tiang [$S_{e(1)}$]
2. Penurunan ujung tiang akibat beban yang bekerja [$S_{e(2)}$]
3. Penurunan akibat gesekan selimut sepanjang tiang akibat beban yang bekerja [$S_{e(3)}$] (Vesic, 1977)

Total penurunan elastis pada satu tiang akibat beban yang bekerja:

$$S_e = S_{e(1)} + S_{e(2)} + S_{e(3)} \quad (6)$$

Di mana,

$$S_{e(1)} = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws}) L_p}{A_p E_p} \quad (7)$$

$$S_{e(2)} = \frac{q_{wp} D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{wp} = \frac{Q_{wp} C_p}{D q_p} \quad (8)$$

$$S_{e(3)} = \left(\frac{Q_{ws}}{p L_p} \right) \frac{D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{ws} = \frac{Q_{ws} C_s}{L_p q_p} \quad (9)$$

Sedangkan penurunan elastis pada tiang kelompok dirumuskan sebagai:

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}} S_e \quad (10)$$

Keterangan:

Q_{wp} : beban yang bekerja pada ujung tiang (kN)

Q_{ws} : beban yang bekerja pada gesekan selimut tiang (kN)

A_p : luas penampang tiang (m^2)

L_p : panjang tiang (m)

E_p : modulus elastisitas tiang (kN/m^2)

ξ : konstanta berdasarkan nilai *skin friction distribution* (0,5-0,67)

D : diameter tiang (m)

q_{ws} : beban per luas area yang bekerja pada gesekan selimut tiang (kN/m^2)

q_{wp} : beban per luas area yang bekerja pada ujung tiang (kN/m^2)

E_s : modulus elastis tanah (kN/m^2)

μ_s : poisson's ratio tanah

q_p : beban *ultimate* yang bekerja pada ujung tiang (kN)

- I_{wp} : faktor pengaruh (0,85)
 C_p : koefisien empiris
 C_s : konstanta empiris
 p : perimeter tiang (m)
 I_{ws} : faktor pengaruh

Penurunan konsolidasi primer

Pada saat lapisan tanah yang tersaturasi diberi pembebanan secara konstan, maka akan air akan keluar dan menempati area yang kosong sehingga menyebabkan perubahan volume pada lapisan tanah tersebut dimana proses ini disebut penurunan konsolidasi primer.

Berikut rumus penurunan konsolidasi primer berdasarkan kondisi tegangannya :

1. *Normally consolidated*, dimana *effective overburden pressure* merupakan *maximum pressure* yang pernah diterima oleh tanah tersebut . ($\sigma'_c \leq \sigma'_o$),

$$\Delta S_c = \left[\frac{C_c H}{1+e_o} \right] \log \left[\frac{\sigma'_o + \Delta \sigma'_i}{\sigma'_o} \right] \quad (11)$$

2. *Overconsolidated*, dimana *effective overburden pressure* lebih kecil daripada *pressure* yang pernah diterima sebelumnya.

- ($\sigma'_o + \Delta \sigma'_q \leq \sigma'_c$) (OC 1) ,

$$\Delta S_c = \frac{C_s H}{1+e_o} \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta \sigma'_i}{\sigma'_c} \right) \quad (12)$$

- ($\sigma'_o + \Delta \sigma'_q > \sigma'_c$) (OC 2) ,

$$\Delta S_c = \frac{C_s H}{1+e_o} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} + \frac{C_c H}{1+e_o} \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta \sigma'_i}{\sigma'_c} \right) \quad (13)$$

Keterangan:

- ΔS_c : penurunan konsolidasi primer (m)
 e_o : angka pori awal tanah
 C_c : indeks pemuaiian
 C_s : indeks pemampatan kembali
 H : ketebalan lapisan tanah (m)
 σ'_o : *effective overburden pressure* (kN/m²)
 σ'_c : tekanan prakonsolidasi (kN/m²)
 S_c : penurunan konsolidasi total primer pada tiang kelompok (m)

Penurunan konsolidasi sekunder

Penurunan konsolidasi sekunder terjadi setelah penurunan konsolidasi primer berakhir, dimana tegangan air pori sudah mendekati angka nol.

Penurunan konsolidasi sekunder dirumuskan sebagai berikut:

$$S_s = C_\alpha \frac{H}{1+e_p} \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (14)$$

$$e_p = e_o - \Delta e_{primary} \quad (15)$$

$$\Delta e = C_c \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta \sigma'_i}{\sigma'_o} \right) \quad (16)$$

Keterangan:

- e_o : angka pori awal tanah
 e_p : angka pori di saat akhir konsolidasi primer
 Δe : perubahan angka pori
 H : tebal lapisan (m)
 t_2 : waktu yang dibutuhkan saat konsolidasi sekunder (s)
 t_1 : waktu yang dibutuhkan saat konsolidasi primer (s)
 C_α : indeks pemampatan sekunder
 S_s : penurunan konsolidasi sekunder (m)

Waktu dan kecepatan penurunan konsolidasi

Untuk derajat konsolidasi 0-60%:

$$T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U\%}{100} \right)^2 \quad (17)$$

Untuk derajat konsolidasi di atas 60%

$$T_v = 1,781 - 0,933 \log(100 - U\%) \quad (18)$$

Kecepatan penurunan konsolidasi harus diperhatikan apabila penurunan yang terjadi cukup besar. Berikut merupakan rumus penurunan konsolidasi dalam waktu tertentu (t):

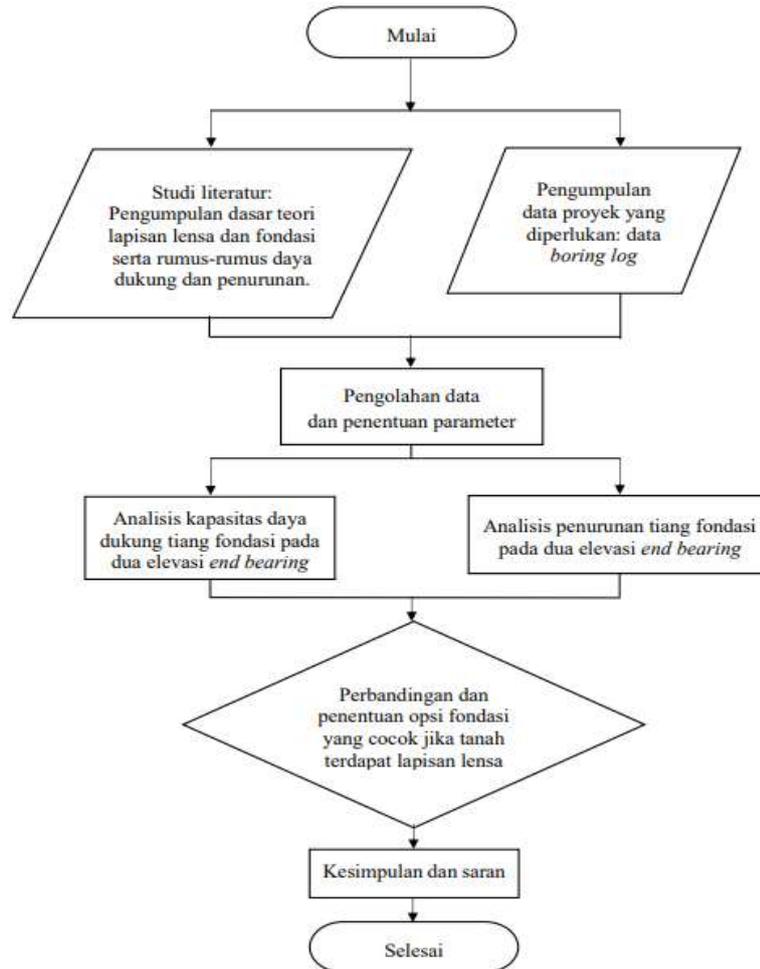
$$t = \frac{T_v H_{dr}^2}{C_v} \quad (19)$$

Keterangan:

- U : derajat konsolidasi (%)
 T_v : faktor waktu
 C_v : koefisien konsolidasi pada interval tekanan tertentu (m^2/s)
 H_{dr} : tinggi tegangan air pori ke lapisan tembus air (m)

2. METODE PENELITIAN

Secara umum tahapan penelitian dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 4.



Gambar 4 Diagram alir penelitian

Metodologi penelitian yang digunakan untuk menyelesaikan penelitian ini dilakukan secara urut sebagai berikut:

1. Penentuan topik penelitian yang akan dianalisis.
2. Melakukan studi literatur dengan mencari dan mengumpulkan dasar teori dan rumus-rumus dari buku-buku literatur, jurnal, artikel, *website* yang digunakan untuk melakukan analisis lapisan lensa, daya dukung tanah, fondasi dalam, dan penurunan yang terjadi pada tiang fondasi
3. Pada penelitian ini, data penyelidikan tanah diberikan oleh pembimbing. Data yang diberikan dari lokasi Cengkareng, Jakarta Barat. Data tersebut berupa data *boring log* dengan kedalaman lapisan lensa berada di elevasi 16 – 18,45 m dan data laboratorium. Setelah itu, dilakukan korelasi data tanah untuk mendapatkan parameter-parameter tanah yang dibutuhkan.
4. Menghitung kapasitas daya dukung tanah dan penurunan tanah secara manual. Analisis data dilakukan dengan perhitungan daya dukung ujung pada lapisan lensa menggunakan metode *punching shear* dari Meyerhof dan Hanna (1978) dan pada lapisan tanah keras menggunakan metode N-SPT dari Meyerhof (1956). Sedangkan untuk menghitung daya dukung selimut digunakan metode N-SPT dari Meyerhof (1956). Selanjutnya, dilakukan perhitungan penurunan yang terjadi pada tiang dengan rumus-rumus dari buku-buku Braja M Das.
5. Menentukan opsi fondasi yang sesuai pada tanah yang terdapat lapisan lensa.
6. Membuat kesimpulan dan saran secara menyeluruh dari hasil penelitian agar dapat bermanfaat untuk orang-orang.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data tanah yang diperoleh berupa satu titik boring log tersebut diolah menggunakan korelasi rumus empiris yang ada sehingga menghasilkan parameter tanah yang dibutuhkan dan disusun seperti pada Tabel 1 sebagai berikut.

Tabel 1 Parameter tanah

Elevation (m)	Depth (m)	Type of soil	Consistency	N-SPT	γ_{sat} (kN/m ³)	e_0	E (MPa)	S_u (kPa)	C_c	C_s	P'_c	
0	2,45	1,225	Silt	Stiff	9	19	0,6	10	30	0,16	0,09	207
2,45	4,45	3,45	Clay	Stiff	3	17	2,8	4	10	1,1	0,41	41
4,45	6,45	5,45	Clay	Soft	4	17	2,8	5	14	1,1	0,41	56
6,45	8,45	7,45	Clay	Soft	10	18	0,8	11	33	0,43	0,13	168
8,45	10,45	9,45	Clay	Medium Stiff	12	19	0,6	13	40	0,32	0,09	201
10,45	12,45	11,45	Clay	Stiff	14	19	0,6	15	46	0,32	0,09	235
12,45	14,45	13,45	Clay	Medium stiff	7	18	0,7	8	23	0,38	0,11	96
14,45	16,45	15,45	Sand	Medium dense	50	20	0,6	54	164	0,05	0,08	1082
16,45	18,45	17,45	Sand	Medium dense	47	19	0,7	50	154	0,07	0,09	976
18,45	20,45	19,45	Clay	Medium stiff	5	18	0,8	6	17	0,44	0,13	58
20,45	22,45	21,45	Clay	Very soft	2	15	1,2	3	7	0,71	0,19	18
22,45	24,45	23,45	Clay	Soft	3	17	2,8	4	10	1,02	0,41	30
24,45	26,45	25,45	Clay	Stiff	21	19	0,6	23	69	0,32	0,09	332
26,45	28,45	27,45	Clay	Very stiff	23	20	0,5	25	76	0,23	0,08	365
28,45	30,45	29,45	Clay	Very stiff	24	20	0,5	26	79	0,23	0,08	378
30,45	32,45	31,45	Clay	Very stiff	30	20	0,5	32	99	0,23	0,08	491
32,45	34,45	33,45	Silt	Very stiff	37	19	0,5	40	122	0,13	0,07	627
34,45	36,45	35,45	Silt	Very stiff	27	19	0,5	29	89	0,13	0,07	416
36,45	38,45	37,45	Silt	Hard	50	20	0,4	54	164	0,1	0,06	887
38,45	40,45	39,45	Silt	Hard	50	20	0,4	54	164	0,1	0,06	875
40,45	42,45	41,45	Silt	Hard	50	20	0,4	54	164	0,1	0,06	865
42,45	44,45	43,45	Silt	Very stiff	26	19	0,5	28	86	0,13	0,07	377
44,45	46,45	45,45	Clay	Very stiff	26	20	0,5	28	86	0,23	0,08	373
46,45	48,45	47,45	Clay	Very stiff	30	20	0,5	32	99	0,23	0,08	441
48,45	50,45	49,45	Clay	Very stiff	30	20	0,5	32	99	0,23	0,08	436
50,45	52,45	51,45	Clay	Hard	50	21	0,4	54	164	0,13	0,06	817
52,45	54,45	53,45	Silt	Hard	50	20	0,4	54	164	0,1	0,06	809
54,45	56,45	55,45	Silt	Hard	50	20	0,4	54	164	1,1	0,06	801
56,45	58,45	57,45	Sand	Dense	50	21	0,5	54	164	0,02	0,07	793
58,45	60,45	59,45	Sand	Dense	32	21	0,5	34	105	0,02	0,07	450

Daya dukung aksial tanah

Dari data tanah yang diperoleh, dapat dilihat bahwa lapisan lensa berada di kedalaman 16 m dan lapisan tanah keras berada di kedalaman 38 m. Perhitungan daya dukung aksial tiang tunggal pada lensa dengan daya dukung ujung dihitung berdasarkan metode *Punching shear* dari Meyerhof dan Hanna, dan perhitungan daya dukung selimut dihitung berdasarkan metode N-SPT dari Meyerhof 1956, sedangkan perhitungan pada lapisan tanah keras dengan daya dukung ujung dan daya dukung selimut berdasarkan metode N-SPT dari Meyerhof 1956. Dimensi penampang yang digunakan berupa tiang pancang berbentuk lingkaran dengan diameter 0,6 m. Berat tiang fondasi diperhitungkan dan faktor keamanan diambil angka 3. Berikut Tabel 2 merupakan hasil perhitungan daya dukung fondasi.

Tabel 2 Perhitungan daya dukung fondasi

Kedalaman (m)	Q_p (Ton)	Q_s (Ton)	W_p (Ton)	Q_{all} (Ton)
16	73	27	11	90
38	164	95	26	233

Kebutuhan tiang pada lapisan lensa

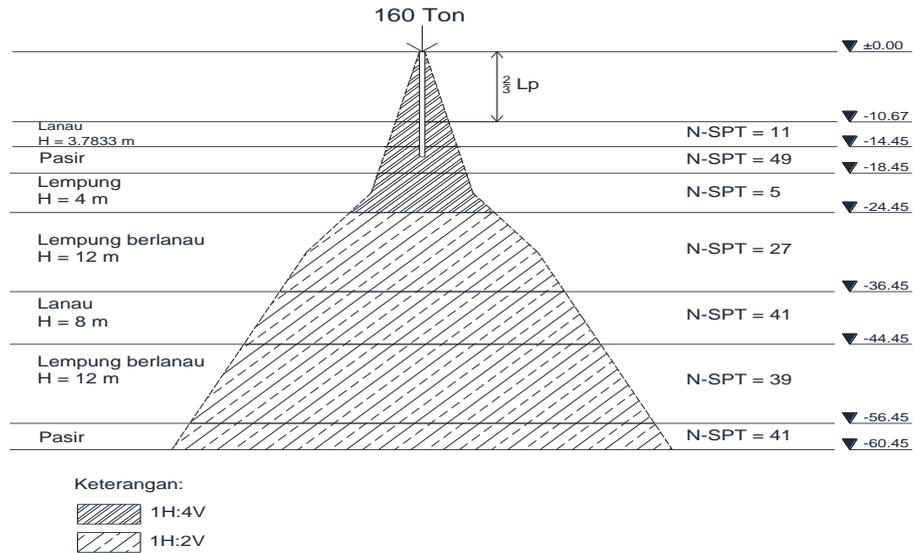
Kebutuhan tiang apabila kapasitas tanah keras duduk di lapisan lensa diperhitungkan dengan kapasitas daya dukung ujung pada tanah keras dibagi dengan daya dukung ujung pada lensa yang sudah dikalikan dengan efisiensi. Nilai efisiensi pada penelitian kali ini diasumsi dengan nilai 0,8. Sehingga dari perhitungan tersebut disimpulkan bahwa dibutuhkan 3 tiang pada lapisan lensa untuk dapat menahan beban kapasitas tanah keras dan diperoleh daya dukung tiang kelompok pada lapisan lensa sebesar 243 Ton.

Distribusi tegangan

Penyebaran gaya yang bekerja pada suatu bidang dengan luas tertentu terjadi karena adanya beban dari luar terhadap kedalaman yang ditinjau. Tegangan yang diterima akan semakin kecil apabila kedalaman yang ditinjau semakin jauh. Nilai beban luar pada penelitian ini diberikan oleh pembimbing, di mana pada lapisan lensa tiang akan menerima beban sebesar 1600 kN dan pada lapisan tanah keras akan menerima beban sebesar 2400 kN. Penambahan tegangan dihitung dengan metode 4V:1H pada lapisan lensa dan 2V:1H pada lapisan tanah keras. Berikut Tabel 3 dan Gambar 5 merupakan hasil perhitungan dan ilustrasi distribusi penambahan tegangan pada lapisan lensa.

Tabel 3 Distribusi penambahan tegangan pada lapisan lensa

Elevasi (m)	Z (m)	B_g (m)	L_g (m)	A_g (m ²)	F_z (kN)	$\Delta\sigma'$ (kPa)	
10,667	14,45	12,558	6,791	6,791	47,3229	1600	33,8102
14,45	18,45	16,45	8,825	8,825	77,8806	1600	20,5443
18,45	24,45	21,45	11,325	11,325	128,2556	1600	12,4751
24,45	36,45	30,45	25,717	25,717	661,347	1600	2,4193
36,45	44,45	40,45	35,717	35,717	1275,68	1600	1,2542
44,45	56,45	50,45	45,717	45,717	2090,013	1600	0,7655
56,45	60,45	58,45	53,717	53,717	2885,48	1600	0,5545

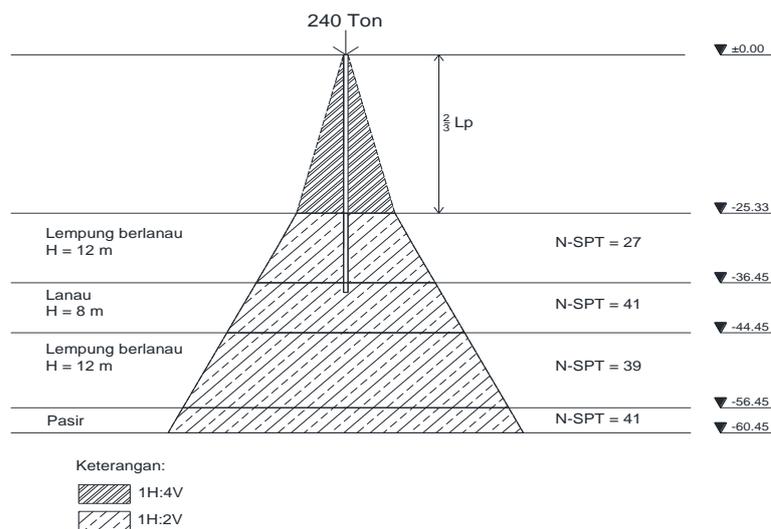


Gambar 5 Distribusi tegangan pada lapisan lensa

Berikut Tabel 4 dan Gambar 6 merupakan hasil perhitungan dan ilustrasi distribusi penambahan tegangan pada lapisan tanah keras.

Tabel 4 Distribusi penambahan tegangan pada lapisan tanah keras

Elevasi (m)	Z (m)	B_g (m)	L_g (m)	A_g (m ²)	F_z (kN)	$\Delta\sigma'$ (kPa)	
25,33	36,45	30,892	18,825	18,825	354,381	2400	6,7224
36,45	44,45	40,45	28,383	28,383	805,6136	2400	2,9791
44,45	56,45	50,45	38,383	38,383	1473,281	2400	1,629
56,45	60,45	58,45	46,383	46,383	2151,413	2400	1,1155

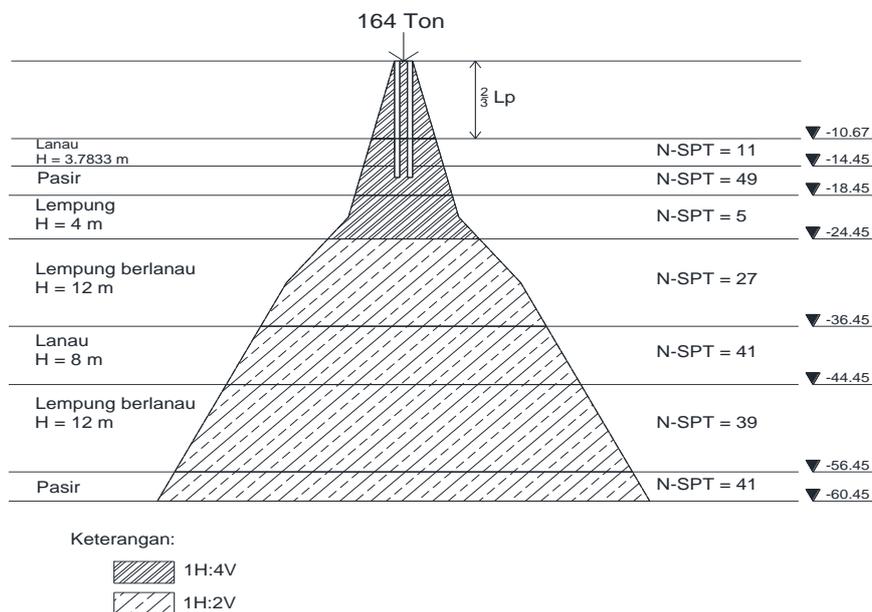


Gambar 6 Distribusi tegangan pada lapisan tanah keras

Berikut Tabel 5 dan Gambar 7 merupakan hasil perhitungan dan ilustrasi distribusi penambahan tegangan pada lapisan lensa dengan beban kapasitas tanah keras.

Tabel 5 Distribusi penambahan tegangan pada lapisan lensa dengan beban kapasitas tanah keras

Elevasi (m)	Z (m)	B_g (m)	L tegak (m)	A_g (m ²)	F_z (kN)	$\Delta\sigma'$ (kPa)	
10,667	14,45	12,558	8,3792	7,2566	30,402	1640	53,9438
14,45	18,45	16,45	10,325	8,9417	46,1616	1640	35,5274
18,45	24,45	21,45	12,825	11,1068	71,2222	1640	23,0265
24,45	36,45	30,45	27,217	23,5703	320,7528	1640	5,113
36,45	44,45	40,45	37,217	32,2308	599,7574	1640	2,7344
44,45	56,45	50,45	47,217	40,8908	965,3644	1640	1,6989
56,45	60,45	58,45	55,217	47,819	1320,204	1640	1,2422



Gambar 7 Distribusi tegangan pada lapisan lensa dengan kapasitas Lapisan Tanah Keras

Penurunan elastis fondasi tiang

Penurunan elastis biasanya terjadi pada tanah lanau, lempung, dan pasir yang mempunyai derajat kejenuhan (S_r) < 90% dan terjadi sekitar 0-7 hari. Besarnya penurunan segera ini akan bergantung pada kondisi dari fondasi dan jenis dari material di mana fondasi tersebut berada (Das, 1998). Berikut Tabel 6 merupakan hasil penurunan elastis fondasi tiang.

Tabel 6 Penurunan elastis fondasi tiang

Kedalaman (m)	n (tiang)	S_{e1} (cm)	S_{e2} (cm)	S_{e3} (cm)	S_e (cm)
16	1	0,24	3,65	0,06	3,95
16	3	0,09	1,25	0,02	1,35
38	1	0,09	4,62	0,06	5,51

Penurunan konsolidasi primer fondasi tiang

Pada konsolidasi primer hanya diperhitungkan saat tanah merupakan tanah lempung dan lanau dan tidak diperhitungkan apabila tanah merupakan tanah pasir. Berikut Tabel 7, Tabel 8, dan Tabel 9 merupakan hasil penurunan tiang tunggal dan tiang kelompok konsolidasi primer pada lapisan lensa dan lapisan tanah keras.

Tabel 7 Penurunan tiang tunggal konsolidasi primer pada lapisan lensa

Elevasi (m)	H (m)	$\Delta\sigma'$ (kPa)	P'_o (kPa)	$P'_o + \Delta\sigma'$ (kPa)	P'_c (kPa)	Sifat	C_c	C_s	e_0	S_p (cm)	
10,67	14,45	3,783	33,8	151,33	185,14	165	OC 2	0,34	0,1	0,65	4,76
14,45	18,45						Tanah pasir				
18,45	24,45	6	12,47	235,23	247,71	270	OC 1	0,56	0,21	1,38	0,79
24,45	36,45	12	2,42	345,51	347,93	378	OC 1	0,33	0,13	0,85	0,25
36,45	44,45	8	1,25	427,03	428,29	685	OC 1	0,18	0,07	0,44	0,05
44,45	56,45	12	0,77	549,31	550,08	580	OC 1	0,17	0,08	0,46	0,04
56,45	60,45						Tanah pasir				
										Total penurunan konsolidasi primer	5,9

Tabel 8 Penurunan tiang tunggal konsolidasi primer pada lapisan tanah keras

Elevasi (m)	H (m)	$\Delta\sigma'$ (kPa)	P'_o (kPa)	$P'_o + \Delta\sigma'$ (kPa)	P'_c (kPa)	Sifat	C_c	C_s	e_0	S_p (cm)	
25,33	36,45	11,12	6,77	351,73	358,51	435	OC 1	0,21	0,08	0,52	0,48
36,45	44,45	8	2,98	433,25	436,23	685	OC 1	0,18	0,07	0,44	0,12
44,45	56,45	12	1,63	555,53	557,16	580	OC 1	0,17	0,08	0,46	0,08
56,45	60,45						Tanah pasir				
										Total penurunan konsolidasi primer	0,68

Tabel 9 Penurunan tiang kelompok konsolidasi primer pada lapisan lensa

Elevasi (m)	H (m)	$\Delta\sigma'$ (kPa)	P'_o (kPa)	$P'_o + \Delta\sigma'$ (kPa)	P'_c (kPa)	Sifat	C_c	C_s	e_0	S_p (cm)	
10,67	14,45	3,783	53,94	151,33	205,28	165	OC 2	0,34	0,1	0,65	8,25
14,45	18,45						Tanah pasir				
18,45	24,45	6	23,03	235,23	258,26	270	OC 1	0,56	0,21	1,38	1,43
24,45	36,45	12	5,11	345,51	350,63	378	OC 1	0,33	0,13	0,85	0,54
36,45	44,45	8	2,73	427,03	429,77	685	OC 1	0,18	0,07	0,44	0,11
44,45	56,45	12	1,7	549,31	551,01	580	OC 1	0,17	0,08	0,46	0,09
56,45	60,45						Tanah pasir				
										Total penurunan konsolidasi primer	10,42

Penurunan konsolidasi sekunder fondasi tiang

Pada perhitungan konsolidasi sekunder, diasumsi penurunan primer selesai setelah saat derajat konsolidasi (U) mencapai 90%. Berikut Tabel 10, Tabel 11, dan Tabel 12 merupakan hasil penurunan tiang tunggal dan tiang kelompok konsolidasi sekunder pada lapisan lensa dan lapisan tanah keras.

Tabel 10 Penurunan tiang tunggal konsolidasi sekunder pada lapisan lensa

Elevasi (m)	H (m)	$\Delta\sigma'$ (kPa)	P'_o (kPa)	C_α	e_0	Δe_p	e_p	t_1 (tahun)	t_2 (tahun)	S_s (cm)	
10,67	14,45	3,78	33,8	151,3	0,017	0,65	0,03	0,6	0,6668	37,6039	6,95
14,45	18,45										
18,45	24,45	6	12,5	235,2	0,23	1,38	0,013	1,4	8,9704	31,9626	3,18
24,45	36,45	12	2,42	345,5	0,015	0,85	0,001	0,8	38,5416	44,7237	0,65
36,45	44,45	8	1,25	427,0	0,008	0,44	0,0002	0,4	17,1296	18,2897	0,13
44,45	56,45	12	0,77	549,3	0,01	0,46	0,0001	0,5	38,5416	39,4907	0,08
56,45	60,45										
Total penurunan konsolidasi Sekunder										10,99	

Tabel 11 Penurunan tiang tunggal konsolidasi sekunder pada lapisan tanah keras

Elevasi (m)	H (m)	$\Delta\sigma'$ (kPa)	P'_o (kPa)	C_α	e_0	Δe_p	e_p	t_1 (tahun)	t_2 (tahun)	S_s (cm)	
24,45	36,45	11,1	6,77	351,7	0,012	0,52	0,002	0,5	33,0763	46,5985	1,27
36,45	44,45	8	2,98	433,2	0,008	0,44	0,0005	0,4	17,1296	19,9631	0,3
44,45	56,45	12	1,63	555,5	0,01	0,46	0,0002	0,5	38,5416	40,5643	0,18
56,45	60,45										
Total penurunan konsolidasi Sekunder										1,75	

Tabel 12 Penurunan tiang kelompok konsolidasi sekunder pada lapisan lensa

Elevasi (m)	H (m)	$\Delta\sigma'$ (kPa)	P'_o (kPa)	C_α	e_0	Δe_p	e_p	t_1 (tahun)	t_2 (tahun)	S_s (cm)	
10,67	14,45	3,78	53,94	151,3	0,017	0,65	0,05	0,6	0,6668	296,3017	10,6
14,45	18,45										
18,45	24,45	6	23,03	235,2	0,23	1,38	0,023	1,4	8,9704	89,1468	5,78
24,45	36,45	12	5,11	345,5	0,015	0,85	0,002	0,8	38,5416	52,7164	1,37
36,45	44,45	8	2,73	427,0	0,008	0,44	0,0005	0,5	17,1296	19,7555	0,27
44,45	56,45	12	1,7	549,3	0,01	0,46	0,0002	0,5	38,5416	40,6777	0,19
56,45	60,45										
Total penurunan konsolidasi Sekunder										18,22	

Berikut Tabel 13 merupakan hasil penurunan total fondasi di mana merupakan penjumlahan dari penurunan elastis, penurunan konsolidasi primer, dan penurunan konsolidasi sekunder.

Tabel 13 Penurunan fondasi total

Kedalaman (m)	n (tiang)	P (Ton)	S_e (cm)	S_p (cm)	S_s (cm)	S_{total} (cm)
16	1	160	3,95	5,89	10,99	21
16	3	164	2,52	10,42	18,22	32
38	1	240	5,51	0,68	1,75	8

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Daya dukung ujung yang diperoleh pada lapisan lensa (73 Ton) lebih kecil daripada tanah keras (164 Ton). Hal ini disebabkan oleh di bawah lapisan lensa merupakan tanah lunak dengan N-SPT di bawah 15 dan di bawah lapisan tanah keras yang sebenarnya sudah merupakan tanah keras dengan N-SPT di atas 50.
2. Penurunan yang terjadi pada lapisan lensa sangat besar. Hal ini dapat terjadi karena terdapat tanah lunak di bawah lensa dimana nilai N-SPT di bawah 15 sehingga penurunan yang terjadi semakin besar.
3. Jenis penurunan terbesar yang terjadi pada lapisan lensa merupakan penurunan konsolidasi sekunder, dimana didapatkan penurunan konsolidasi sekunder 10,99 cm, sedangkan penurunan elastis didapatkan sebesar 3,95 cm dan penurunan konsolidasi primer didapatkan sebesar 5,89 cm.
4. Jenis penurunan terbesar yang terjadi pada lapisan tanah keras merupakan penurunan elastis, dimana didapatkan penurunan elastis 5,51 cm, sedangkan penurunan konsolidasi primer didapatkan sebesar 0,68 cm dan penurunan konsolidasi sekunder didapatkan sebesar 1,75 cm.
5. Dibutuhkan 3 tiang untuk kapasitas tanah keras yang duduk di lensa sedalam 16 m. Akan tetapi, pemilihan 3 tiang yang duduk di lensa tersebut tidak disarankan karena penurunan tiang yang terjadi sangat besar, yaitu 31,16 cm.
6. Lapisan lensa sebagai lapisan *end bearing* tidak selamanya menjadi suatu pilihan yang buruk. Hal ini dibalikkan pada fungsi bangunan struktur atas. Apabila beban luar tidak begitu besar dan penurunan memenuhi syarat, maka fondasi yang duduk di lensa akan menjadi pilihan yang cocok karena lebih ekonomis. Beban maksimum yang dapat ditahan satu tiang pada lapisan lensa di penelitian ini adalah 21,5 Ton dimana penurunan lebih kecil daripada penurunan izin yaitu 2,54 cm

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, penelitian dapat dilanjutkan dengan menggunakan lebih banyak data boringlog, dengan memperhitungkan beban gempa dan lateral, serta dengan dibandingkan analisis melalui program *software* yang tersedia.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standarisasi Nasional. SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik. Jakarta, 2017.
- Das, B. M. (1998). Mekanika Tanah Jilid 1. Jakarta: Erlangga.
- Das, B. M. (1998). Mekanika Tanah Jilid 2. Jakarta: Erlangga.
- Das, B. M. (2011). Principles of Foundation Engineering 7th. USA: Global Engineering.
- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2017). Principles of Foundation Engineering (9th ed.). Boston, USA: Global Engineering.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2012). Principles of Geotechnical Engineering (8th ed.). Global Engineering.
- Imanzadeh, S., Denis, A., & Marache, A. (2014). Settlement Uncertainty Analysis for Continuous Spread. *Geotechnical and Geological Engineering*.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). Mekanika Tanah 1. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Hendrayana, H., & Ramadhika, R. (2016). Penentuan Zona Konservasi Cekungan Air Tanah Wates, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. 5-8.
- Setiyowati, Y., & Arifin, Y. F. (2018). Analisis Daya Dukung Tiang Group pada Tanah Berlensa di Kota Banjarmasin dengan Plaxis 2d. *Jurnal Teknologi Berkelanjutan*, 7.
- Sutjiamidjaja, N. (2017). Studi Parametrik Efek Ketebalan Lensa Pasir Padat terhadap Reaksi Settlement Gedung Bertingkat Tinggi dengan Pondasi Tiang Pancang di Jakarta. *UNPAR Institutional Repository*.
- Vesic, A. (1977). Design of Pile Foundations. Washington, DC: National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Practice No. 42, Transportation Research Board.

