

ANALISIS DEFLEKSI DAN KAPASITAS LATERAL TIANG TUNGGAL PADA TANAH KOHESIF DENGAN BERBAGAI JENIS KONSISTENSI TANAH

Gregory Agustino¹ dan Andryan Suhendra²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
gregory.325150211@stu.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
andryansuhendra@yahoo.com

Masuk: 17-01-2020, revisi: 11-02-2020, diterima untuk diterbitkan: 17-02-2020

ABSTRACT

There are 2 main elements on a foundation that must be retained from the structure above, the axial force and lateral force. The ability of the foundation to resist lateral forces and deflections that occur due to these forces can be measured by various methods, one of the methods that used in this case is the p-y curve method. In addition to soil types, the lateral capacity and lateral deflection of the pile are also affected by the consistency of the soil itself. Therefore, the writer wants to compare the lateral capacity and lateral displacement of the pile in clay with the consistency of soft, medium, and hard soils. The lateral capacity of medium clay has 100% greater capacity compared to soft clay. The lateral capacity of hard soil increase 600% greater than soft soil. The lateral capacity of the pile also varies with the depth of the pile reviewed. On soft and medium soils with a depth of 5 m the pile has an increase in lateral capacity of 12% to 17% when compared to the lateral capacity at a depth of 10 m.

Keywords: pile foundation; lateral deflection; p-y curve; lateral capacity; clay

ABSTRAK

Pada suatu fondasi terdapat 2 elemen utama yang harus ditahan dari struktur di atasnya, yaitu gaya aksial dan gaya lateral. Kemampuan fondasi dalam menahan gaya lateral dan defleksi yang terjadi akibat gaya tersebut dapat diukur dengan berbagai metode, salah satu metode yang digunakan dalam penulisan ini adalah metode *p-y curve*. Selain jenis tanah, kapasitas lateral dan defleksi lateral tiang ini juga dipengaruhi oleh konsistensi tanah itu sendiri. Oleh karena itu, dalam penulisan ini penulis hendak membandingkan kapasitas lateral dan perpindahan lateral tiang pada tanah lempung dengan konsistensi tanah lunak, sedang, dan keras. Kapasitas lateral tanah lempung sedang memiliki kapasitas yang lebih besar 100% jika dibandingkan dengan tanah lempung lunak. Sedangkan kapasitas lateral tanah keras memiliki kenaikan kapasitas lateral mencapai 600% jika dibandingkan dengan tanah lunak. Kapasitas lateral tiang ini juga berbeda tiap kedalaman tiang yang ditinjau. Pada tanah lunak dan sedang dengan kedalaman tiang 5 m memiliki kenaikan kapasitas lateral sebesar 12% sampai 17% jika dibandingkan dengan kapasitas lateral pada kedalaman 10 m.

Kata kunci: fondasi tiang; perpindahan horizontal; p-y curve; kapasitas lateral; tanah lempung

1. PENDAHULUAN

Latar belakang

Fondasi tiang merupakan elemen struktur yang berfungsi untuk meneruskan beban ke tanah, baik beban arah vertikal maupun beban arah horizontal. Beban arah vertikal disebut dengan beban aksial, sedangkan beban arah horizontal disebut dengan beban lateral. Sebuah fondasi tiang harus memiliki tahanan atau daya dukung yang lebih besar dibandingkan dengan beban yang dipikulnya. Fondasi tiang pun dibedakan menjadi fondasi dengan *free end* dan fondasi *fixed end*. Pada fondasi *free end*, defleksi dipengaruhi juga oleh jarak dari ujung tiang ke muka tanah. Semakin jauh jarak ujung tiang ke muka tanah maka semakin besar kemungkinan defleksi yang terjadi. Salah satu metode yang ingin digunakan pada pembahasan ini adalah metode *p-y curve*. Batasan masalah yang dibahas yaitu parameter tanah akan dikorelasi berdasarkan data N_{SPT} . Kajian terhadap defleksi tiang pancang dengan pedoman kepala tiang dianggap bebas akibat beban lateral sehingga beban aksial tidak diperhitungkan. Tipe tiang pancang menggunakan tiang pancang beton berbentuk lingkaran dengan panjang 20 meter. Masalah perencanaan yang harus diselesaikan yaitu analisis defleksi dan kapasitas lateral tiang pada tanah kohesif lunak, sedang, dan keras. Tujuan dari penelitian

ini adalah untuk mengamati defleksi dan kapasitas lateral tiang pada tanah kohesif dengan jenis konsistensi tanah lunak, sedang, dan keras pada kedalaman tiang 5, 10, 15, dan 20 meter dengan bantuan program.

Definisi fondasi

Definisi fondasi menurut para ahli, antara lain adalah sebagai berikut:

1. Fondasi adalah suatu struktur yang berada di bawah tanah yang meneruskan beban yang ditopang oleh fondasi dan berat sendiri ke dalam tanah dan batuan yang terletak di bawahnya (Bowles, 1988).
2. Fondasi adalah bagian dari suatu bangunan yang berfungsi meneruskan berat bangunan tersebut ke tanah di mana bangunan itu didirikan (*Terzaghi and Peck*, 1991).
3. Fungsi fondasi ini adalah meneruskan beban konstruksi ke lapisan tanah yang berada di bawah fondasi. Suatu perencanaan fondasi dikatakan benar apabila beban yang diteruskan oleh fondasi ke tanah tidak melampaui kekuatan tanah yang bersangkutan. Apabila kekuatan tanah dilampaui, maka penurunan yang berlebihan atau keruntuhan dari tanah akan terjadi (Das, 1999).

Jenis fondasi tiang

Ada 2 jenis fondasi tiang menurut teknis pelaksanaannya yaitu sebagai berikut:

1. Tiang Pancang

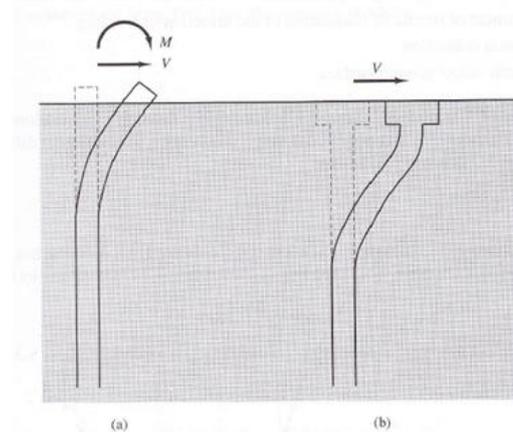
Fondasi jenis ini adalah fondasi tiang yang telah dibuat terlebih dahulu sebelum dimasukkan ke dalam tanah hingga mencapai kedalaman tertentu. Terdapat beberapa cara dalam melakukan pemancangan tiang, yang paling umum adalah cara penanaman dengan cara memancang, yaitu memukul kepala tiang berulang kali dengan palu khusus. Selain itu ada juga cara penggetaran dan penekanan tiang secara hidrolis (Sandjaja, 2015).

2. Tiang Bor

Pelaksanaan fondasi tiang bor dilakukan dengan pengecoran langsung di tempat, dimana beton dicetak menurut lubang pada tanah yang telah dibor berbentuk seperti tiang dengan kedalaman tertentu dan telah dimasukkan tulangan yang telah dirangkai sebelumnya (Sandjaja, 2015).

Free head pile dan fixed head pile

Rahardjo (2017) mengatakan bahwa dalam menganalisis, kondisi kepala tiang dibedakan menjadi kondisi kepala tiang bebas (*free head*) dan kepala tiang terjepit (*fixed head*). Kondisi kepala tiang bebas berarti bagian atas tiang bisa dengan bebas bergerak ke arah samping dan berputar ketika ada gaya geser atau momen. Sedangkan kondisi kepala tiang terjepit, bagian atas tiang boleh bergerak ke arah samping tetapi tidak diperbolehkan mengalami rotasi.



Gambar 1. Tipe koneksi antara tiang dengan struktur: (a) Free Head; (b) Fixed Head (Sumber: Coduto, 2001)

Defleksi izin lateral

Berdasarkan Peraturan P₂B No 50 Tahun 2007, defleksi izin maksimum pada tiang *fixed head* adalah sebesar 6 mm pada beban lateral 100% dan 12,5 mm pada beban lateral 200%.

Pada kondisi tiang *free head*, defleksi izin maksimum yang diizinkan sebesar 10 mm pada beban lateral 100% dan 25 mm pada beban lateral yang bekerja sebesar 200%. Hal ini juga disebutkan dalam SNI 8460-2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik pada subbab 9.7.3.1 mengenai kapasitas izin lateral tiang, disebutkan bahwa deformasi lateral izin tiang sebesar 12 mm untuk gempa rencana dan 25 mm untuk gempa kuat dalam kondisi tiang *free head*.

Metode Reese & Matlock

Metode Reese Matlock merupakan metode analisis daya dukung lateral berdasarkan defleksi lateral maksimum yang diizinkan. Pada metode ini, tiang dibedakan berdasarkan tiang kaku (tiang pendek) dan tiang elastik (tiang panjang) serta dibedakan berdasarkan kondisi kepala terjepit dan bebas.

1. Kepala Tiang Bebas (*Free Head*)

Defleksi y_x dan m_x dapat dihitung dengan rumus berikut

$$y_x = y_A + y_B = A_x \frac{H \cdot T^3}{E_p \cdot I_p} + B_x \frac{M \cdot T^2}{E_p \cdot I_p} \quad (1)$$

$$M_x = M_A + M_B = A_m \cdot H \cdot T + B_m \cdot M \quad (2)$$

dengan y_x = defleksi yang terjadi pada tiang, M_x = momen yang terjadi pada tiang, H = beban lateral yang bekerja di kepala tiang, T = faktor kekakuan, M = momen yang bekerja di kepala tiang, E_p = modulus elastisitas tiang, I_p = inersia penampang tiang, A dan B = koefisien Reese dan Matlock untuk kepala tiang bebas

2. Kepala Tiang Terjepit (*Fixed Head*)

$$y_x = F_y \cdot \frac{H \cdot T^3}{E_p \cdot I_p} \quad (3)$$

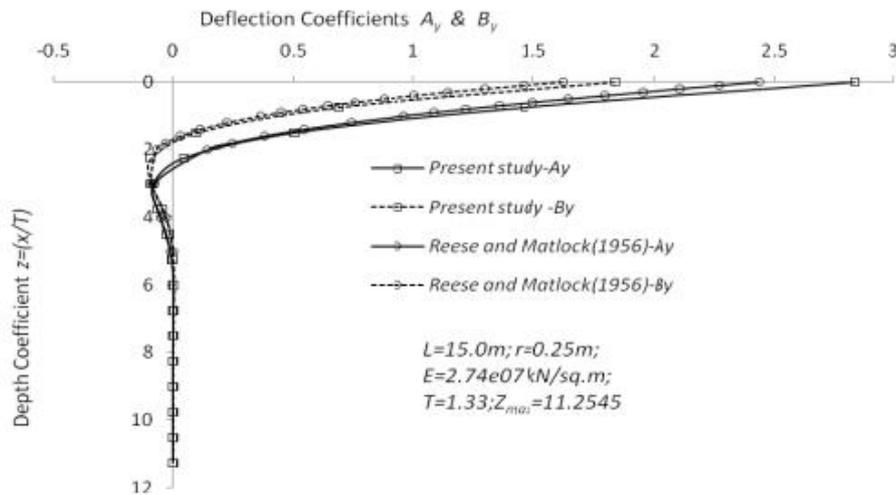
$$M_x = F_m \cdot H \cdot T \quad (4)$$

dengan H = beban lateral yang bekerja di kepala tiang, T = faktor kekakuan, E_p = modulus elastisitas tiang, I_p = inersia penampang tiang, F_y dan F_m = koefisien Reese dan Matlock untuk kepala tiang bebas

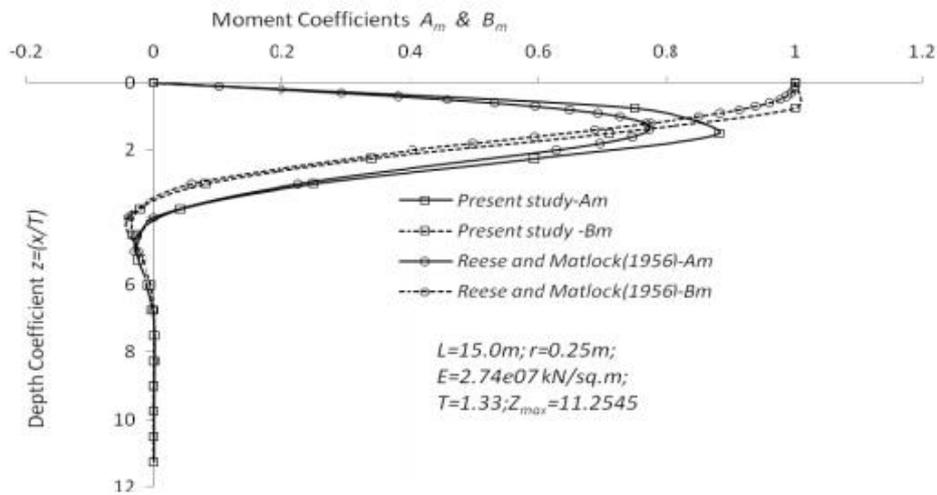
Tabel 1. Koefisien A dan B

Z	A_y	A_m	B_y	B_m
0.0	2.435	0.000	1.623	1.000
0.1	2.273	0.100	1.453	1.000
0.2	2.112	0.198	1.293	0.999
0.3	1.952	0.291	1.143	0.994
0.4	1.796	0.379	1.003	0.987
0.5	1.644	0.459	0.873	0.976
0.6	1.496	0.532	0.752	0.960
0.7	1.353	0.595	0.642	0.939
0.8	1.216	0.649	0.540	0.914
0.9	1.086	0.693	0.448	0.885
1.0	0.962	0.727	0.354	0.852
1.2	0.738	0.767	0.223	0.775
1.4	0.544	0.772	0.112	0.688
1.6	0.381	0.746	0.029	0.594
1.8	0.247	0.696	0.030	0.498
2.0	0.142	0.628	0.070	0.404
3.0	-0.075	0.225	0.089	0.059
4.0	-0.050	0.000	0.028	-0.042
5.0	-0.009	-0.033	0.000	-0.026

(Sumber: Woodward. Et.al., 1972)



Gambar 2. Koefisien Ay & By (Reese & Matlock, 1956)



Gambar 3. Koefisien Am & Bm (Reese & Matlock, 1956)

Metode beda hingga tanah lempung (*p-y curve*)

Pada tahun 1970, Matlock melakukan pengujian beban lateral pada tiang baja dengan diameter 0,3 meter dan dengan kedalaman 12,8 meter ditancapkan pada tanah lempung di daerah Danau Austin, Texas. Matlock mengusulkan *p-y curve* berbentuk parabola yang ditentukan oleh modulus tangent awal teoritis.

Persamaan yang diajukan oleh Matlock untuk jenis tanah lempung lunak dengan kondisi air bebas adalah sebagai berikut:

$$H_u = \left[3 + \frac{\gamma'}{c} z + \frac{J}{b} z \right] cb \quad (5)$$

$$H_u = 9cb \quad (6)$$

$$y_{50} = 2,5 e_{50} b \quad (7)$$

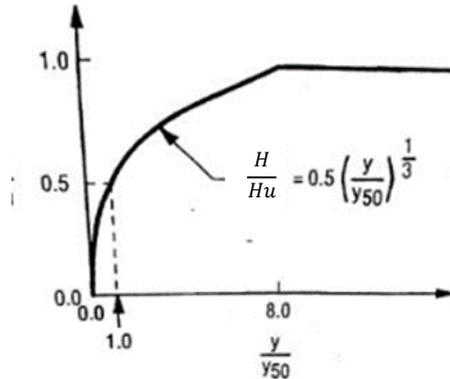
$$H = 0,5 H_u \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{1/3} \quad (8)$$

$$y = 8y_{50} \quad (9)$$

dengan γ' = berat isi efektif tanah, z = kedalaman, c = kuat geser tidak terdrainase rata-rata pada kedalaman z , b = diameter atau lebar tiang, $J = 0,5$ untuk lempung lunak dan $0,25$ untuk lempung sedang, H_u = daya dukung

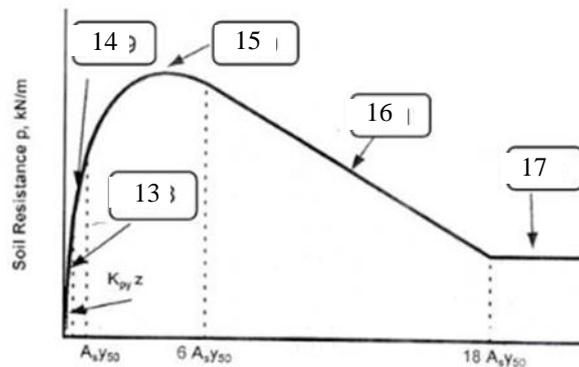
tanah *ultimate*, H = daya dukung tanah, y_{50} = defleksi tiang pada setengah daya dukung *ultimate*, y = defleksi tiang dan e_{50} = regangan pada setengah tegangan utama maksimum.

Grafik karakteristik *p-y curve* dengan beban statik pada tanah lempung lunak dengan air bebas dapat dilihat pada Gambar 4



Gambar 4. Bentuk karakteristik *p-y curve* dengan beban statik pada tanah lempung lunak dengan air bebas (Sumber: Reese dkk, 2006)

Reese et al. (1975) melakukan pengujian pembebanan lateral pada tiang baja dengan diameter 0,6 meter kedalaman 15,2 meter di tanah lempung kaku sekitar daerah Manor, Texas. *p-y curve* untuk tanah lempung kaku dengan air bebas yang diusulkan oleh Reese et al ini, terdiri dari 5 bagian dan bentuk parabola.



Gambar 5. Bentuk karakteristik *p-y curve* dengan beban statik pada tanah lempung kaku dengan air bebas (Sumber: Reese dkk, 2006)

Daya dukung tanah *ultimate* (H_u) dan defleksi tiang pada setengah daya dukung *ultimate* (y_{50}) ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$H_u = 2c_a b + \gamma b z + 2,83 c_a z \quad (10)$$

$$H_u = 11 c b \quad (11)$$

$$y_{50} = \epsilon_{50} b \quad (12)$$

Bagian pertama *p-y curve*, merupakan garis lurus awal yang memiliki kekakuan awal (k_{py}). Garis lurus awal ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$H = (k_{py} z) y \quad (13)$$

Bagian kedua dan ketiga $p-y$ curve merupakan kurva yang membentuk parabola dengan persamaan berikut:

$$H = 0,5 H_u \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{1/2} \tag{14}$$

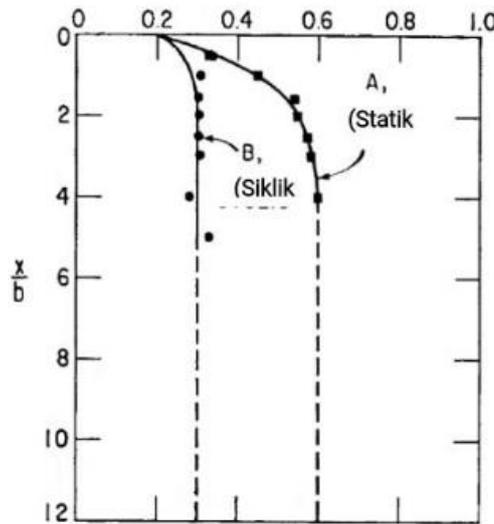
$$H = 0,5 H_u \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{1/2} - 0,055 H_u \left(\frac{y - A_s \cdot y_{50}}{A_s \cdot y_{50}} \right)^{1,25} \tag{15}$$

Bagian terakhir terdiri dari dua garis lurus yang ditunjukkan dengan persamaan berikut:

$$H = 0,5 H_u (6A_s)^{1/2} - 0,411 H_u - \frac{0,0625}{y_{50}} H_u (y - 6A_s y_{50}) \tag{16}$$

$$H = H_u [1,255(A_s)^{1/2} - 0,75A_s - 0,411] \tag{17}$$

dengan k_{py} = modulus reaksi tanah awal dan A = koefisien untuk pembebanan statis.

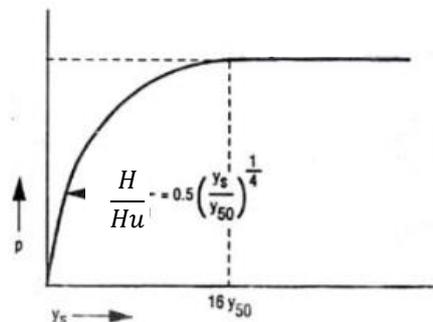


Gambar 6. Hubungan nilai koefisien A dengan kedalaman (Sumber: Reese dkk, 2006)

Pada tahun 1975, Reese dan Welch mengajukan bentuk $p-y$ curve untuk tanah lempung kaku pada kondisi di atas muka air tanah. Persamaan untuk kurva yang membentuk parabola yaitu:

$$H = 0,5 H_u \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{1/4} \tag{18}$$

Nilai H_u menggunakan rumus 10 dan 11 dengan nilai koefisien J sebesar 0,5. Nilai p konstan saat y melewati $16y_{50}$.



Gambar 7. Bentuk karakteristik $p-y$ curve dengan beban statik pada tanah lempung kaku tanpa air bebas oleh Reese dan Welch pada tahun 1975 (Sumber: Reese dkk, 2006)

2. METODE PENELITIAN

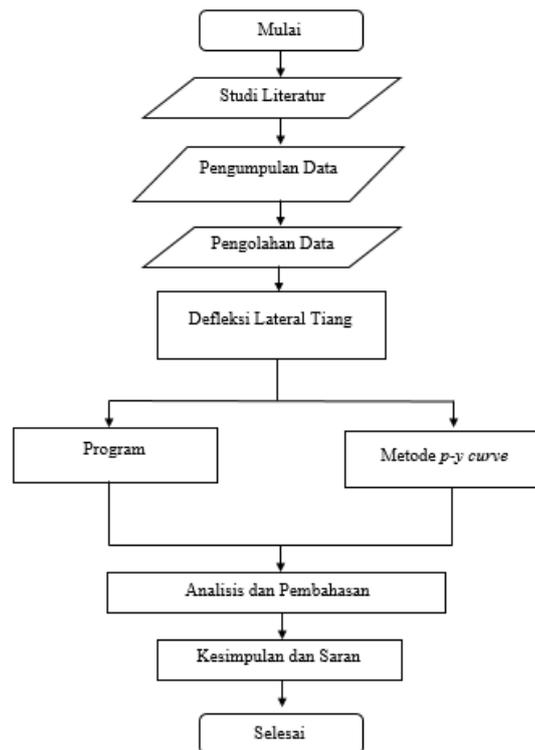
Pengumpulan data

Kajian teknis kali ini berada di salah satu proyek di Jakarta. Data yang dikumpulkan adalah berdasarkan hasil peninjauan di lokasi proyek dengan mengumpulkan hasil uji tanah yang telah dilakukan. Data yang dikumpulkan adalah data hasil tes SPT (Standart Penetration Test) dan hasil uji laboratorium.

Pengelolaan data

Metode pengelolaan data yang dilakukan untuk menganalisa data menggunakan program berbasis metode keseimbangan batas. Analisis akan dilakukan pada konsistensi tanah yang berbeda. Hasil analisis berupa hubungan antara daya dukung tanah lateral dengan defleksi dari tiap jenis konsistensi tanah. Kemudian hasil analisis tersebut dibandingkan berdasarkan jenis konsistensi tanah.

Diagram alir



Gambar 8. Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter tiang pancang

Tiang pancang yang digunakan adalah *driving concrete pile* dengan diameter 600 mm dengan mutu beton $f'c$ 41,5 MPa. Digunakan rumus $4700\sqrt{f'c}$ yang terdapat pada SNI 2847:2013 untuk memperoleh nilai modulus elastisitas dari tiang tersebut.

Tiang pancang ini memiliki tahanan *momen crack* sebesar 17 ton.m dan tahanan *momen ultimate* sebesar 25,5 ton.m (Sumber: Brosur Wika Beton).

$$\begin{aligned} - E &= 4700\sqrt{f'c} \\ &= 4700\sqrt{41,5} \\ &= 30277,63 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$- I = \frac{1}{64} \pi D^4$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{64} \pi (600)^4 \\
 &= 6361725124 \text{ mm}^4 \\
 - \quad A &= \pi (300)^2 \\
 &= 282743,34 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Parameter tanah

Parameter tanah dilakukan berdasarkan hasil korelasi dari data tanah yang tersedia. Adapun ringkasan parameter tanah yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2

Tabel 2. Ringkasan parameter tanah

Kedalaman (m)	N _{SPT}	Tipe Tanah	Konsistensi Tanah	γ_{sat} (kN/m ³)	Cu (kN/m ²)	K (Mn/m ³)	ϵ_{50} (%)
0-30	3	Lempung	Lunak	13,42	7	8,14	2
0-30	6	Lempung	Sedang	14,3	42	27,15	0,7
0-30	30	Lempung	Keras	18,7	210	543	0,4

P-y curve tanah lunak

Persamaan yang diajukan oleh Matlock untuk jenis tanah lempung lunak dengan kondisi air bebas menggunakan persamaan 1 sampai 5 pada panjang tiang berada di kedalaman 5 meter.

Diketahui data tanah adalah sebagai berikut:

Kedalaman	: 5 m
N _{spt}	: 3
Berat isi efektif tanah	: 3,42 kN/m ³
Sudut geser dalam	: 0°
Su	: 21 kN/m ²
Cu	: 21 kN/m ²
J	: 0,5 (lempung lunak)
b	: 0,6 m

A. Menghitung kapasitas lateral tiang

Kapasitas lateral tiang dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 1 dan 2

- $$H_u = \left[3 + \frac{\gamma'}{c} z + z \frac{J}{b} \right] cb$$

$$H_u = \left[3 + \frac{3,42}{21} \times 5 + 5 \times \frac{0,5}{0,6} \right] \times 21 \times 0,6$$

$$H_u = 100,56 \text{ kN/m}$$
- $$H_u = 9cb$$

$$H_u = 9 \times 21 \times 0,6$$

$$H_u = 113,4 \text{ kN/m}$$

Diambil yang terendah dari 2 persamaan diatas jadi H_u yang dipakai adalah 100,56 kN

B. Menghitung defleksi maksimum tiang

- $y_{50} = 2,5 \epsilon_{50} b$
 $y_{50} = 2,5 \times 0,02 \times 0,6$
 $y_{50} = 0,03 \text{ m}$
- $y = 8y_{50}$
 $y = 8 \times 0,03$
 $y = 0,24 \text{ m (defleksi maksimum)}$

C. Menghitung hubungan beban lateral (H) dan defleksi lateral (y)

Hubungan H-Y dihitung dengan menggunakan Persamaan 4 dan dapat dilihat pada Tabel 3

Tabel 3. Hubungan p-y tanah lunak pada panjang tiang 5 m

H (kN/m)	y (m)	p/pu	y/y50
0	0	0	0
10,05	$2,4 \times 10^{-4}$	0,10	0,01
39,91	0,015	0,40	0,50
45,68	0,022	0,45	0,75
57,56	0,045	0,57	1,50
65,89	0,068	0,66	2,25
70,44	0,083	0,70	2,75
72,51	0,090	0,72	3,00
100,56	0,240	1,00	8,00

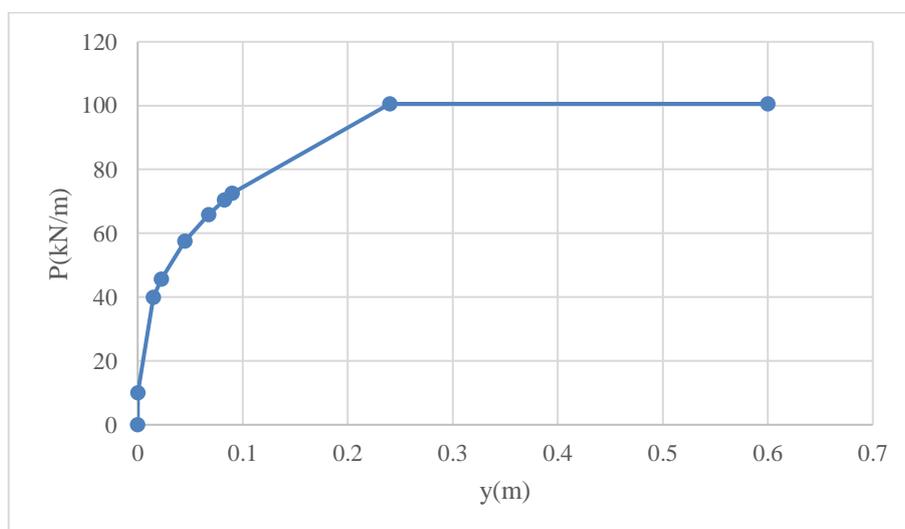
Berikut contoh perhitungan hubungan beban lateral (H) dan defleksi lateral tiang (y):

$$H = 0,5 H_u \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{1/3}$$

$$H = 0,5 \times 100,56 \times \left(\frac{0,015}{0,03} \right)^{1/3}$$

$$H = 39,91 \text{ kN/m}$$

Grafik hubungan antara beban lateral (H) dan defleksi (y) dapat dilihat pada Gambar 9



Gambar 9. Perhitungan manual grafik p-y curve tanah lunak pada panjang tiang 5 m

P-y curve tanah sedang

Persamaan yang diajukan oleh Matlock untuk jenis tanah lempung sedang dengan kondisi air bebas menggunakan persamaan 1 sampai 5

Diketahui data tanah adalah sebagai berikut:

Kedalaman	: 5 m
Nspt	: 3
Berat isi efektif tanah	4,3 kN/m ³
Sudut geser dalam	: 0°
Su	: 42 kN/m ²
Cu	: 42 kN/m ²
J	: 0,5 (lempung lunak)
b	: 0,6 m

A. Menghitung kapasitas lateral tiang

Kapasitas lateral tiang dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 1 dan 2

- $H_u = [3 + \frac{Y'}{c} z + z \frac{J}{b}] cb$
 $H_u = [3 + \frac{4,3}{42} \times 5 + 5 \times \frac{0,5}{0,6}] \times 42 \times 0,6$
 $H_u = 193,5 \text{ kN/m}$
- $H_u = 9cb$
 $H_u = 9 \times 42 \times 0,6$
 $H_u = 226,8 \text{ kN/m}$

Diambil yang terendah dari 2 persamaan diatas, H_u yang dipakai adalah 193,5 kN

B. Menghitung defleksi maksimum tiang

- $y_{50} = 2,5 \epsilon_{50} b$
 $y_{50} = 2,5 \times 0,007 \times 0,6$
 $y_{50} = 0,0105 \text{ m}$
- $y = 8y_{50}$
 $y = 8 \times 0,0105$
 $y = 0,084 \text{ m (defleksi maksimum)}$

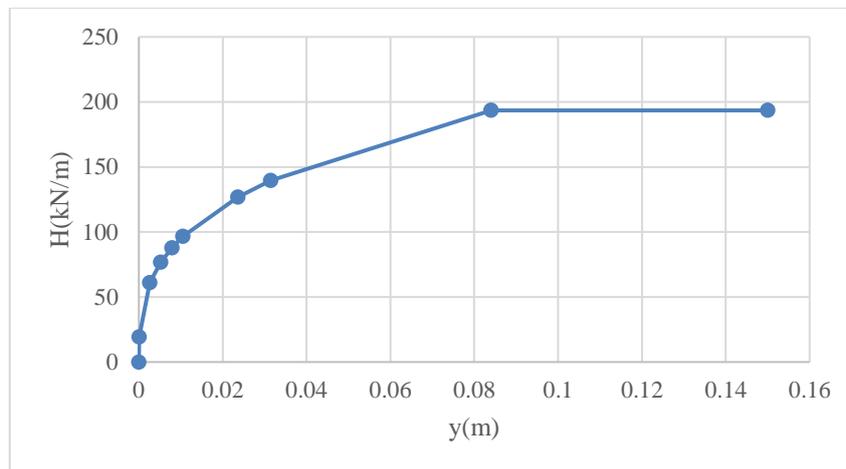
C. Menghitung hubungan beban lateral (H) dan defleksi lateral (y)

Hubungan P-Y dihitung dengan menggunakan Persamaan 4 dan dapat dilihat pada Tabel 4

Tabel 4. Hubungan h-y tanah sedang pada panjang tiang 5 m

H (kN/m)	y (m)	H/Hu	y/y50
0	0	0	0
19,35	$8,4 \times 10^{-5}$	0,10	0,01
60,95	0,003	0,32	0,25
76,79	0,005	0,40	0,50
87,90	0,008	0,45	0,75
96,75	0,011	0,50	1,00
126,78	0,024	0,66	2,25
139,54	0,032	0,72	3,00
193,50	0,084	1,00	8,00

Grafik hubungan antara beban lateral (H) dan defleksi (y) dapat dilihat pada Gambar 10



Gambar 10. Perhitungan manual grafik h-y curve tanah sedang pada panjang tiang 5 m

P-y curve tanah keras

Persamaan yang diajukan oleh Matlock untuk jenis tanah lempung sedang dengan kondisi air bebas menggunakan persamaan 6 sampai 13.

Diketahui data tanah adalah sebagai berikut:

- Kedalaman : 5 m
- N_{spt} : 30
- Berat isi efektif tanah : 8,7 kN/m³
- Sudut geser dalam : 0°
- Su : 210 kN/m²
- Cu : 210 kN/m²
- As : 0,6 (Gambar 2.6)
- b : 0,6 m
- K_{py} : 543 Mn/m³

A. Menghitung kapasitas lateral tiang

- $H_u = 2c_{ab} + \gamma bz + 2,83c_{az}$
 $H_u = 2 \times 210 \times 0,6 + 8,7 \times 0,6 \times 5 + 2,83 \times 210 \times 5$
 $H_u = 3249,6 \text{ kN/m}$
- $H_u = 11cb$
 $H_u = 11 \times 210 \times 0,6$
 $H_u = 1386 \text{ kN/m}$

Diambil yang terendah dari 2 persamaan diatas jadi H_u yang dipakai adalah 1386 kN/m

B. Menghitung defleksi maksimum tiang

- $y_{50} = \epsilon_{50} b$
 $y_{50} = 0,004 \times 0,6$
 $y_{50} = 0,0024 \text{ m}$
- $A_s y_{50} = 0,6 \times 0,0024$
 $= 0,0014 \text{ m}$
- $6A_s y_{50} = 0,0084 \text{ m}$
- $18A_s y_{50} = 0,026 \text{ m (defleksi maksimum)}$

C. Menghitung hubungan beban lateral (H) dan defleksi lateral (y)

1. $0 - A_s y_{50} (0 - 0,0014 \text{ m})$

$$\begin{aligned} H &= (k_{py}z)y \\ &= (543000 \times 5) \times 0,0014 \\ &= 3801 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Kemudian di plot untuk mendapatkan persamaan pertama berupa garis lurus.

2. $A_s y_{50} - 6A_s y_{50} (0,0014 - 0,00864 \text{ m})$

H pada saat y = 0,0014 m

$$\begin{aligned} H &= 0,5 H_u \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{1/2} - 0,055 H_u \left(\frac{y - A_s y_{50}}{A_s y_{50}} \right)^{1,25} \\ H &= 0,5 \times 1386 \times \left(\frac{0,0014}{0,0024} \right)^{0,5} - 0,055 \times 1386 \left(\frac{0,0014 - 0,00144}{0,00144} \right)^{1,25} \\ H &= 529,2875 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

H pada saat y = 0,006 m (P puncak)

$$\begin{aligned} H &= 0,5 H_u \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{1/2} - 0,055 H_u \left(\frac{y - A_s y_{50}}{A_s y_{50}} \right)^{1,25} \\ H &= 0,5 \times 1386 \times \left(\frac{0,006}{0,0024} \right)^{0,5} - 0,055 \times 1386 \left(\frac{0,006 - 0,00144}{0,00144} \right)^{1,25} \\ H &= 773,712 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

H pada saat $y = 0,00864$ m

$$H = 0,5 H_u \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{1/2} - 0,055 H_u \left(\frac{y - A_s \cdot y_{50}}{A_s \cdot y_{50}} \right)^{1,25}$$

$$H = 0,5 \times 1386 \times \left(\frac{0,00864}{0,0024} \right)^{0,5} - 0,055 \times 1386 \left(\frac{0,00864 - 0,00144}{0,00144} \right)^{1,25}$$

$$H = 744,923 \text{ kN/m}$$

3. $6A_{s50} - 18A_{s50}$ (0,00864 – 0,026 m)

H pada saat $y = 0,00864$ m

$$H = 0,5 H_u (6A_s)^{1/2} - 0,411 H_u - \frac{0,0625}{y_{50}} H_u (y - 6A_s y_{50})$$

$$H = 0,5 \times 1386 \times (6 \times 0,6)^{0,5} - (0,411 \times 1386) - \left(\frac{0,0625}{0,0024} \right) \times 1386 (0,00864 - 6 \times 0,6 \times 0,0024)$$

$$H = 745,2291 \text{ kN/m}$$

P pada saat $y = 0,026$ m

$$H = 0,5 H_u (6A_s)^{1/2} - 0,411 H_u - \frac{0,0625}{y_{50}} H_u (y - 6A_s y_{50})$$

$$H = 0,5 \times 1386 \times (6 \times 0,6)^{0,5} - (0,411 \times 1386) - \left(\frac{0,0625}{0,0024} \right) \times 1386 (0,026 - 6 \times 0,6 \times 0,0024)$$

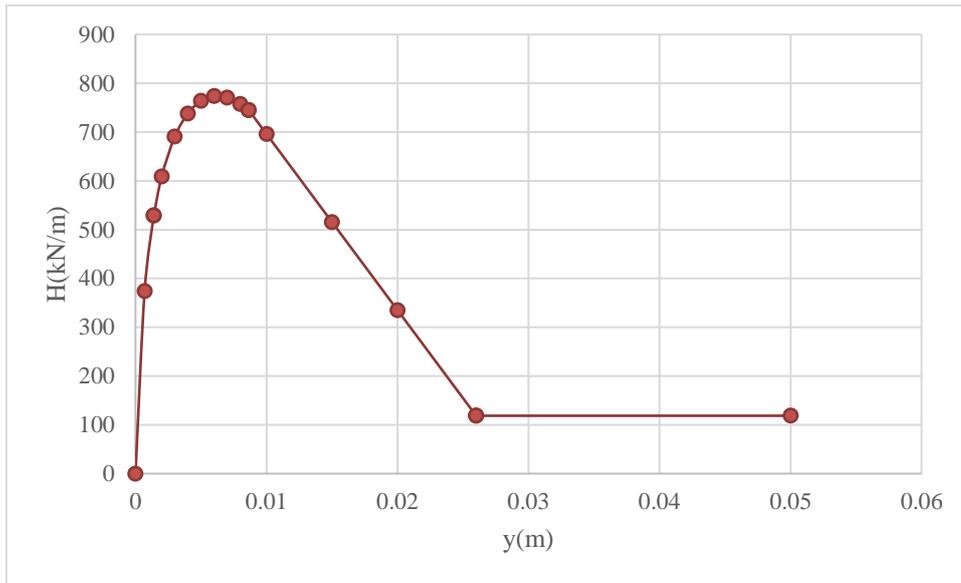
$$H = 118,6416 \text{ kN/m}$$

Hubungan p - y curve dapat dilihat pada Tabel 5

Tabel 5. Hubungan h-y tanah keras pada panjang tiang 5 m

y (m)	H (kN/m)
0	0
7×10^{-4}	374,26
$1,4 \times 10^{-3}$	529,29
$1,4 \times 10^{-3}$	529,29
0,002	609,29
0,003	690,55
0,004	738,18
0,005	763,95
0,006	773,71
0,007	770,94
0,008	757,90
0,009	744,92
0,009	745,23
0,010	696,14
0,015	515,67
0,020	335,20
0,026	118,64

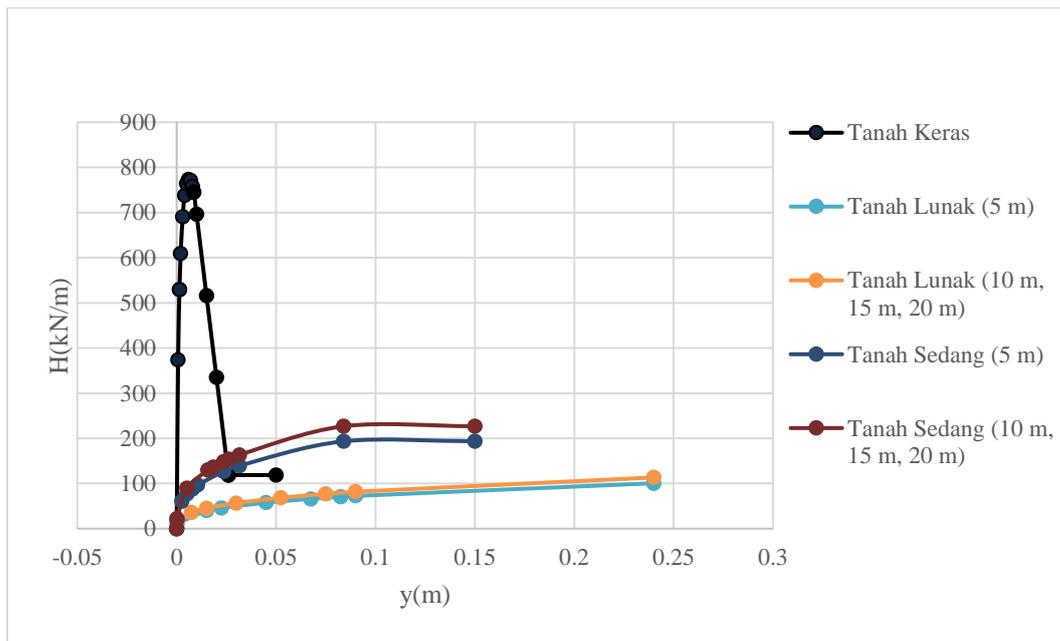
Sehingga didapatkan grafik hubungan p - y curve pada tanah keras saat panjang tiang berada di kedalaman 5 meter yang dapat dilihat pada Gambar 11



Gambar 11. Perhitungan manual grafik h-y curve tanah keras pada panjang tiang 5 m

Perbandingan *p-y curve* untuk tiap konsistensi tanah

Hasil Penggabungan grafik untuk tanah lunak, sedang, dan keras dapat dilihat pada Gambar 12



Gambar 12. Grafik perbandingan h-y curve pada tanah lunak, sedang, dan keras untuk tiap panjang tiang

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan kajian teknis, analisis, dan pembahasan tanah lunak, sedang, dan keras dapat disimpulkan bahwa:

1. Perbandingan analisis menggunakan rumus Matlock dengan analisis menggunakan program pada tanah lunak memperoleh persentase perbedaan yang berkisar antara 0 – 7,15 % dengan persentase perbedaan terbesar pada saat panjang tiang berada di kedalaman 10 meter, 15 meter, dan 20 meter dengan daya dukung tanah sebesar 35,72 kN/m

2. Perbandingan analisis menggunakan rumus Matlock dengan analisis menggunakan program pada tanah sedang memperoleh persentase perbedaan yang berkisar antara 0 – 13,3 % dengan persentase perbedaan terbesar pada saat panjang tiang berada di kedalaman 5 meter dengan daya dukung tanah sebesar 60,95 kN/m
3. Perbandingan analisis menggunakan rumus Matlock dengan analisis menggunakan program pada tanah keras memperoleh persentase perbedaan yang berkisar antara 0 – 6,6 % dengan persentase perbedaan terbesar pada saat panjang tiang berada di kedalaman 5 meter, 10 meter, 15 meter, dan 20 meter dengan daya dukung tanah sebesar 745,229 kN/m
4. Pada kedalaman tiang 5 m, kapasitas lateral tanah sedang 193,5 kN/m lebih besar 92% dari kapasitas tanah lunak 100,56 kN/m. Sedangkan kapasitas lateral tanah keras 773,78 kN/m lebih besar 669,74% dari kapasitas lateral tanah lunak.
5. Pada kedalaman tiang 10 m sampai dengan 20 m, kapasitas lateral tanah sedang 226,8 kN/m lebih besar 100% dari kapasitas tanah lunak 113,4 kN/m. Sedangkan kapasitas lateral tanah keras 773,78 kN/m lebih besar 582,35% dari kapasitas lateral tanah lunak.
6. Daya dukung ultimate tanah lunak pada saat panjang tiang berada di kedalaman 10 meter, 15 meter, dan 20 meter naik 12,77% dari 100,56 kN/m menjadi 113,4 kN/m jika dibandingkan dengan panjang tiang saat berada di kedalaman 5 meter.
7. Daya dukung ultimate tanah sedang pada saat panjang tiang berada di kedalaman 10 meter, 15 meter, dan 20 meter naik sebesar 17,21% dari 193,5 kN/m menjadi 226,8 kN/m jika dibandingkan dengan panjang tiang saat berada di kedalaman 5 meter.

Saran

Dari hasil analisis yang telah dilakukan, penulis memberikan beberapa saran untuk melengkapi kekurangan-kekurangan yang ada, antara lain:

1. Melakukan analisis dengan aplikasi lain sebagai pembandingan dan untuk melengkapi kekurangan-kekurangan pada program keseimbangan batas yang telah dilakukan.
2. Melakukan survey di lapangan dan membandingkannya supaya data yang didapat akan lebih akurat.
3. Perlu dilakukannya uji laboratorium agar didapat parameter dan karakteristik tanah yang lebih akurat
4. Perlu dilakukan analisis lebih lanjut untuk panjang tiang lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standarisasi Nasional. *Standar Nasional Indonesia 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Badan Standarisasi Nasional, 2017.
- Bowles, Joseph E. *Foundation Analysis and Design*. 5th ed. Singapore: McGraw-Hill Companies Inc, 1988.
- Coduto, Donald P., William A. Kitch, dan Man-chu Ronald Yeung. *Foundation Design Principles and Practices*. Pearson, 2010.
- Das, Braja M. *Principle of Geotechnical Engineering*. 4th ed, Canada: Thomson Canada Limited, 1999.
- P2B Prov. DKI Jakarta. *Perkadis P2B No. 50 Tahun 2007 (Pedoman Perencanaan Struktur dan Geoteknik Bangunan)*. P2B Prov. DKI Jakarta, 2007.
- Rahardjo, Paulus P. *Manual Pondasi Tiang*. Ed 5. Bandung: Universitas Katolik Parahyangan, 2017.
- Reese, L.C. dan Matlock, H. *Non-dimensional Solutions for Laterally Loaded Piles with Soil Modulus Assumed Proportional to Depth*. John Wiley & Sons, Inc, 1956.
- Reese, L. C., W. M. Isenhower, S. Wang. *Analysis and Design of Shallow and Deep Foundations*. John Wiley & Sons, Inc, 2006
- Sandjaja, Gregorius. *Diktat Pondasi Tiang II*. Jakarta: Universitas Tarumanagara, 2015.
- Terzaghi, Karl and Ralph B. Peck. *Mekanika Tanah dalam Praktek Rekayasa Jilid -2*. Ed 2. Jakarta: Penerbit Erlangga, 1991.
- Woodward, R.J., Gardener, W.S., and Greer, D.M. *Drilled Pier Foundations*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1972

