



Kapabilitas Momen Maksimum Pondasi Tiang Pendek Silindris Akibat Beban Lateral pada Tanah Lempung dengan Metode Kurva P-Y

Utari Wessy Andriani

Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Merdeka Malang
Jl. Terusan Raya Dieng No 62-64 Malang 65111
Email: wessyandriani@gmail.com

Ita Suhartatik

Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Merdeka Malang
Jl. Terusan Raya Dieng No 62-64 Malang 65111

Abstract

For a certain structure, lateral loads are more dominant than vertical loads. A foundation with a lateral load is due to overturning force relying on good contact between the pile and the soil. This research is about a wll foundation or a rigid pile due to lateral loads on clay, using a cylinder pile model 85 mm diameter with various ratio length of pile (L/D) = 4 to 5 and ratio lies of load (e/L)=1,2 and 4. The results are: (1) Increasing ratio lies of load (e/L) so decreasing maximum lateral load (P_{max}) can be supported by pile foundation, and the increasing maximum displacement and maximum moment. (2) Maximum deflection occur at surface soil with rotation point at average $L/3$ from bottom of pile, and maximum moment occur at $L/3$ from surface soil. (3) The maximum moment of result laboratory test are smaller than the maximum moments of result numeric analysis with consideration value between 1 to 1.5. These differences are caused by the influence of soil processing during laboratory test so they can influence the value of soil parameters. Based on consideration value, the prediction of maximum moment capacity by curve p-y method can be used in the design of pile foundation by considering the use of safety factor=2.

Keywords: Deflection, Maximum moment, Curve p-y, Cylinder pile foundation

Abstrak

Pada suatu konstruksi tertentu beban lateral akan sangat dominan jika dibandingkan dengan beban vertical. Pondasi dengan beban lateral yang menimbulkan gaya guling terhadap pondasi, mengandalkan kontak yang baik antara tiang dengan tanah sekitarnya. Penelitian ini menggunakan model pondasi tiang silindris berdiameter 85 mm dengan variasi panjang tiang tertahan $L/D = 4$ dan 5, dengan variasi perbandingan letak beban $e/L=1,2$ dan 4. Hasil penelitian adalah: (1) semakin besar rasio perbandingan letak beban (e/L), maka lateral beban maksimum (P_{max}) yang mampu ditahan oleh model pondasi tiang silindris akan semakin kecil, dan displacement maximum serta momen maksimum yang terjadi semakin besar. (2) Defleksi maksimum tiang terjadi pada permukaan tanah dengan jarak titik putar rata-rata sebesar $L/3$ dari dasar tiang, dan momen maksimum terjadi pada jarak $L/3$ dari permukaan tanah. (3) Momen maksimum yang diperoleh dari hasil uji laboratorium relatif sedikit lebih kecil dari pada momen hasil analisa numerik dengan angka banding antara 1-1,5. Perbedaan ini dapat terjadi akibat pengaruh pengolahan tanah yang digunakan pada uji laboratorium sehingga mempengaruhi nilai parameter tanah. Berdasarkan hasil perbandingan tersebut, penentuan kapasitas momen maksimum pada perencanaan pondasi tiang pendek silindris dapat digunakan, dengan mengusulkan faktor keamanan sebesar 2.

Kata-kata kunci : Defleksi, Momen maksimum, Kurva p-y, Pondasi tiang silindris.

Pendahuluan

Pada konstruksi tertentu beban lateral pada suatu konstruksi sangat dominan jika dibandingkan dengan beban vertikal, sebagai contoh pada konstruksi: flatform pengeboran minyak, tiang reklame komersil elevasi tinggi, kabel transmisi listrik, kuda-kuda untuk jalan kereta api dan jalan besar, tiang lampu jalan raya atau stadion olah raga, tiang sebagai antenna tunggal, pondasi tiang pada jembatan yang dikenai beban gempa, merupakan suatu konfigurasi struktur untuk menahan momen guling yang bekerja pada pondasi, maka pondasi harus cukup berat untuk menahan stabilitas yang ditimbulkan oleh tekanan tanah pasif pada pondasi.

Banyak cara yang diusulkan oleh para ahli dan banyak program komputer (*software*) yang dapat digunakan untuk merencanakan pondasi tiang, namun dalam aplikasinya di lapangan masih banyak ditemukan kasus tiang penahan beban lateral yang tidak stabil, misalnya; tiang reklame komersil yang miring, konstruksi kabel transmisi listrik yang mengalami miring akibat kabel yang terputus, dan masih banyak kasus lainnya. Keadaan ini menunjukkan bahwa diperlukan tindakan empiris dan praktis dalam merencanakan tiang dengan beban lateral supaya konstruksi tersebut dapat berdiri dengan kokoh dan nyaman dipandang.

Salah satu cara untuk dapat mengetahui besarnya momen yang diterima pondasi tiang pendek adalah dengan menggunakan metode kurva p-y. Dengan mengetahui besar momen kita dapat lebih teliti dalam merencanakan konstruksi yang dikenai beban lateral.

Metode Penelitian

Bahan uji

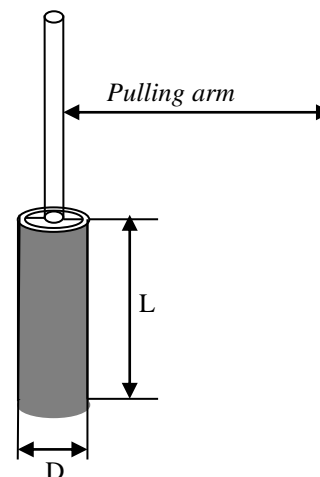
Karena tanah yang banyak dijumpai adalah tanah lempung umum (*c-Ø soil*) disamping itu agar rumusan yang dihasilkan adalah rumusan secara umum maka didalam penelitian ini sebagai bahan uji digunakan tanah lempung umum (*c- Ø soil*) di lokasi Balai Merdeka Universitas Merdeka Malang, bukan tanah lempung murni atau tanah lempung khusus (yang mempunyai perilaku khusus) misalnya tanah lempung ekspansif. Tanah ini termasuk kelompok OH (lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi) dan mempunyai parameter tanah asli seperti Tabel 1.

Model tiang

Model tiang yang digunakan berbentuk silinder seperti pada Gambar 1, dengan spesifikasi model tiang seperti pada Tabel 2. Model tiang berdiameter luar (OD) 85 mm. Rasio panjang tiang dan diameter tiang $L/D=4$ dan $L/D=5$. Untuk kepentingan stabilitas, model tiang diisi dengan beton. Beban horizontal bekerja pada lengan momen (e) dengan perbandingan terhadap panjang tiang (L) adalah : $e/L=1$, dan $e/L=4$. Sedangkan perlengkapan alat uji yang digunakan seperti pada Gambar 2.

Tabel 1. Parameter tanah asli (Laboratorium fakultas teknik Universitas Merdeka Malang)

Parameter tanah	Nilai
Specific gravity (G_s)	2,68
Batas cair (LL)	72%
Batas Plastis (PL)	64%
Kadar air (w)	57%
Sudut geser dalam (ϕ)	20°
Kohesi (C)	0,40 kg/cm ²
Berat isi tanah	1,6 kg/cm ³



Gambar 1. Model tiang silindris (Laboratorium Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang)

Tabel 2. Spesifikasi model tiang

No	Uraian	Tiang silindris
1	Diameter/tebal	OD=85 mm
2	Panjang	4D dan 5 D
3	Bahan	Pipa baja
4	Pulling arm/bahan	OD 25 mm / baja

Metode kurva P-Y

Persamaan diferensial yang harus diselesaikan:

$$P_z = EI \frac{d^4 y}{dz^4} \dots\dots\dots (1)$$

$$S_z = \frac{dy}{dz} \dots\dots\dots (2)$$

$$M_z = EI \frac{d^2 y}{dz^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$V_z = EI \frac{d^3 y}{dz^3} \dots\dots\dots (4)$$

dimana:

- E = modulus elastis tiang (F/L²)
- I = momen inersia tampang tiang (L⁴)
= πD⁴/64 untuk tampang lingkaran
= b⁴/12 untuk tampang bujur sangkar
- Y = defleksi lateral (L)
- p_z = tahanan lateral tanah per-satuan panjang tiang (F/L)
- S_z = kemiringan/slope tiang pada kedalaman z
- M_z = momen lentur tiang pada kedalaman z (F.L)
- V_z = gaya geser pada kedalaman z (F.L)

p dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$p = -E_s y \dots\dots\dots (5)$$

Kondisi batas yang harus dipenuhi:

Pada x=0, gaya geser, $EI \frac{d^3 y}{dx^3} = P \dots\dots\dots (6)$

Pada x=0, momen, $EI \frac{d^2 y}{dx^2} = HP \dots\dots\dots (7)$

Pada x=L, gaya geser, $EI \frac{d^3 y}{dx^3} = 0 \dots\dots\dots (8)$

Pada x=L, momen, $EI \frac{d^2 y}{dx^2} = 0 \dots\dots\dots (9)$

Persamaan differensial dari 4 kondisi batas tersebut diatas adalah :

1. Dari kondisi batas (1) untuk m=0
 $y_2 - y_{-2} - 2y_1 + 2y_{-1} = -\frac{L^3 P}{13,5EI} = -A \dots\dots\dots (10)$

2. Dari kondisi batas (2) untuk m=0
 $y_{-2} - 2y_0 + y_1 = \frac{L^2 M_0}{9EI} = -B \dots\dots\dots (11)$

3. Dari persamaan tekanan lateral (P_m) pada x=0
 $y_{-2} 4y_{-1} + 6y_0 - 4y_1 + y_2 = 0 \dots\dots\dots (12)$

4. Pada $x = \frac{L}{3}, m = 2$
 $y_{-1} 4y_0 + 6y_1 - 4y_2 + y_2 = -\left(\frac{1}{3}\right)^n \frac{kL^4 b}{81EI} y_1 = -\left(\frac{1}{3}\right)^n C y_1 \dots\dots\dots (13)$

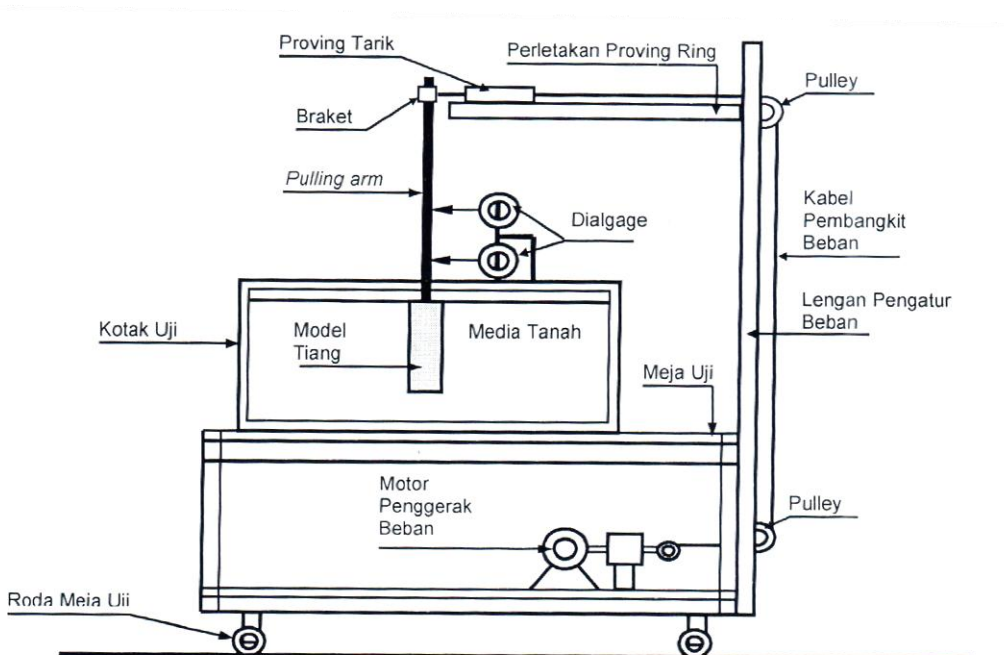
dimana: b = diameter tiang tertanam.

5. Pada $x = \frac{2L}{3}, m = 2$
 $y_0 - 4y_1 + 6y_2 - 4y_3 + y_4 = -\left(\frac{2}{3}\right)^n C y \dots\dots\dots (14)$

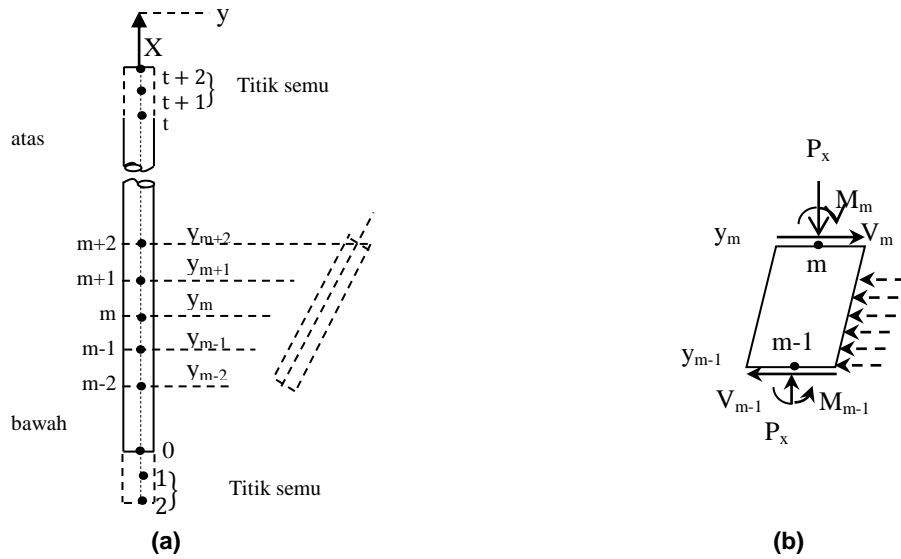
6. Pada $x = L, m = 3$
 $y_1 - 4y_2 + 6y_3 - 4y_4 + y_5 = -C y_2 \dots\dots\dots (15)$

7. Dari kondisi batas (3), pada x=L, m=3
 $y_5 - y_1 - 2y_4 + 2y_2 = 0 \dots\dots\dots (16)$

8. Dari kondisi batas (4), pada x=L, m=3
 $y_2 - 2y_3 + y_4 = 0 \dots\dots\dots (17)$



Gambar 2. Gambar bejana dan perlengkapan uji



Gambar 3. Defleksi tiang dengan persamaan differensial.

dimana $m =$ node (titik) seperti yang terlihat pada Gambar 3.

Solusi dari 8 persamaan differensial berganda di atas menghasilkan koefisien-koefisien:

$$1. \quad A = \frac{L^3 P}{13,5EI} \dots\dots\dots (18)$$

$$2. \quad B = \frac{L^2 M_0}{9EI} \dots\dots\dots (19)$$

$$3. \quad C = \frac{kL^4 b}{81EI} \dots\dots\dots (20)$$

Perhitungan titik rotasi (Xr, persatuan panjang tiang)

$$\alpha = \frac{1}{2} \phi \dots\dots\dots (21)$$

$$\beta - 45^\circ + \frac{1}{2} \phi \dots\dots\dots (22)$$

$$K_0 = 1,67 E_{50} \dots\dots\dots (23)$$

$$K_B = \tan^2(45^\circ - \frac{1}{2} \phi) \dots\dots\dots (24)$$

dimana: E_{50} regangan pada saat 50% kuat geser tanah termobilisasi

Tahanan ultimit tanah (p) per satuan panjang tiang dinyatakan dengan persamaan:

$$P_{cr} = \left[\frac{K_0 \chi \tan \phi \sin \beta}{\tan(\beta - \phi) \cos \chi} + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi)} (D + \chi \tan \beta \tan \alpha) + K_0 \chi \tan \beta (\tan \phi \sin \beta - \tan \alpha) - K_\alpha D \right] \dots\dots\dots (25)$$

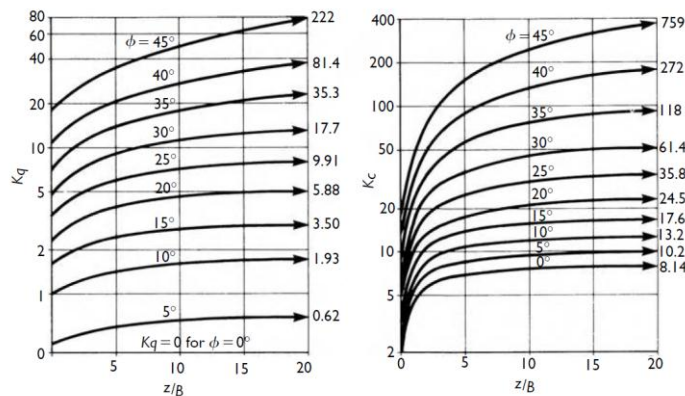
Tahanan ultimit tanah (p) per satuan panjang tiang dibawah muka tanah dinyatakan dengan persamaan:

$$P_{cd} = K_A D \gamma \chi (\tan^2 \beta - 1) + K_0 D \gamma \chi \tan \phi \tan^4 \beta \dots\dots (26)$$

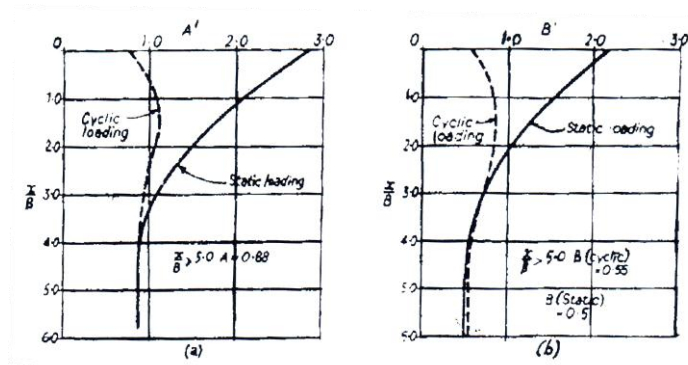
Nilai pu

$$P_z = p_0 K_q + c K_c \dots\dots\dots (27)$$

Koefisien tekanan lateral K_q dan K_c dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Koefisien tahanan tanah lateral (Hansen)



Gambar 5. Grafik A' dan B' (Reese dan Cox)

$$P_0 = \gamma Df \dots\dots\dots (28)$$

$$y_u = 3D/80 \text{ dan } p_u = A' \cdot p_z \dots\dots\dots (29)$$

$$y_m = D/60 \text{ dan } p_m = B' \cdot p_z \dots\dots\dots (30)$$

nilai A' dan B' dapat dilihat pada Gambar 5.

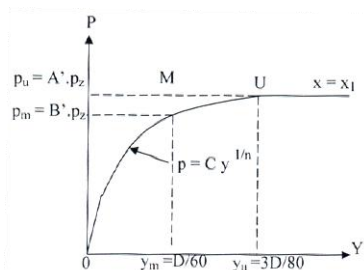
$$p = Cy^{1/n} \dots\dots\dots (31)$$

$$n = \frac{P_m}{m \cdot y_m} \dots\dots\dots (32)$$

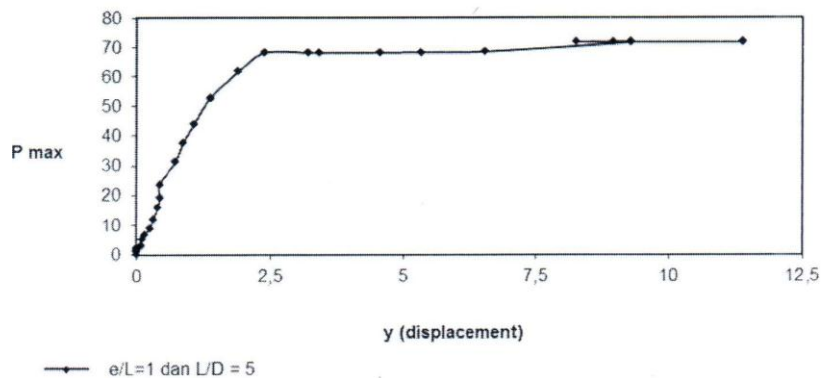
$$m = \frac{p_u - p_m}{y_u - y_m} \dots\dots\dots (33)$$

$$C = \frac{P_m}{y_m^{1/n}} \dots\dots\dots (34)$$

Kurva p-y dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Kurva p-y pada kedalaman x₁



Gambar 7. Penentuan P max pada model pondasi tiang pendek silindris

Defleksi (y)

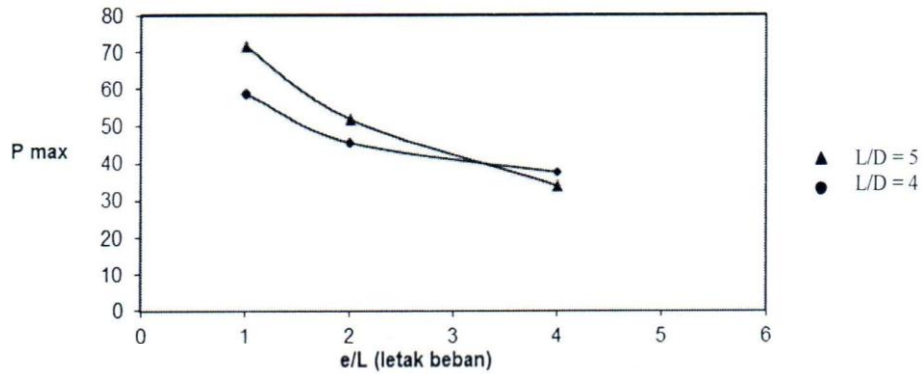
Besarnya defleksi dapat ditentukan dengan menggunakan 9 persamaan differensial (10) s/d (17) dengan penyelesaian menggunakan metode *Eliminasi gauss* dalam bentuk matriks.

$$\begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{matrix} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} \\ a_{21} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{31} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{41} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{51} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{61} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{71} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{81} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -A & \dots & \dots \\ -B & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots \\ -(1/3)^n C_{y1} & \dots & \dots \\ -(2/3)^n C_{y2} & \dots & \dots \\ -C_{y3} & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots \end{pmatrix} \dots (35)$$

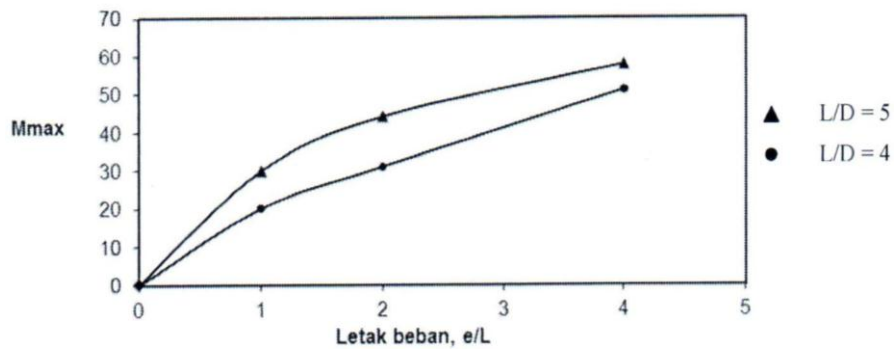
$$-M_m = \frac{9EI}{L^2} (y_{m+1} - 2y_m + y_{m-1}) \dots\dots\dots (36)$$

Hasil Pengujian

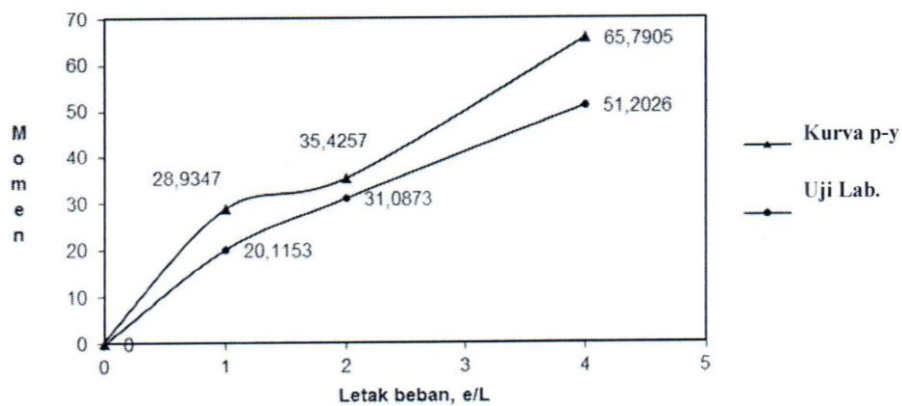
Hasil pengujian laboratorium tentang kapasitas momen maksimum dan beban lateral dapat yang mampu ditahan oleh tiang pendek berbentuk silindris akibat beban lateral pada tanah lempung dengan metode Kurva p-y dapat dilihat pada Gambar 7 sampai dengan Gambar 11.



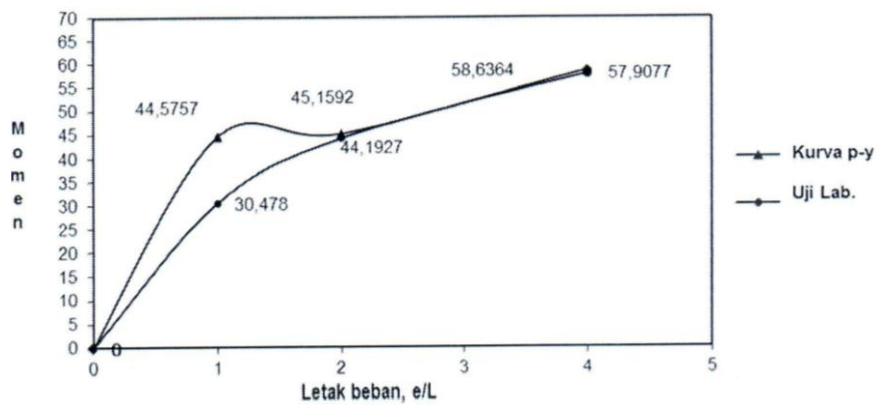
Gambar 8. Grafik beban lateral maximum pada model tiang pendek silindris.



Gambar 9. Grafik momen maximum pada model tiang pendek silindris



Gambar 10. Grafik momen tiang pendek silindris dengan L/D=4



Gambar 11. Grafik momen tiang pendek silindris dengan L/D=5

Pembahasan

Perilaku pondasi tiang pendek kaku akibat beban lateral mengalami defleksi secara linier. Defleksi maksimum tinggi terjadi pada permukaan tanah dengan jarak titik putar rata-rata sebesar $L/3$ dari dasar tiang. Besar defleksi tiang sangat dipengaruhi oleh rasio perbandingan letak beban (e/L). Semakin tinggi rasio perbandingan letak beban maka semakin besar defleksi yang terjadi pada tiang dan semakin besar momen yang terjadi pada sepanjang tiang tertanam.

Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan metode kurva p-y didapatkan momen maksimum terjadi pada jarak $L/3$ dari permukaan tanah dan pada dasar tiang momen yang terjadi adalah nol. Nilai momen baik dari hasil uji laboratorium maupun analisis dengan metoda kurva p-y, sangat dipengaruhi oleh rasio perbandingan letak beban e/L . karena semakin tinggi rasio perbandingan letak beban (e/L), maka semakin besar nilai momen yang terjadi pada sepanjang tiang tertanam.

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan analisis yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan:

1. Momen hasil uji laboratorium relatif sedikit lebih kecil dari momen yang berdasar dari hasil analisa numerik dengan metode kurva p-y dengan nilai banding sebagai berikut:

e/L	L/D=4		L/D=5	
	e/L	Nilai banding	e/L	Nilai banding
1	1,44	1	1,46	
2	1,14	2	1,02	
3	1,28	3	1,01	

2. Kondisi tanah yang telah mengalami *pra-test* dan *pre-loading* belum tentu sesuai dengan kondisi tanah asli, hal ini dapat menyebabkan adanya perubahan nilai parameter tanah asli. Sedangkan dalam analisa numerik dengan metode kurva p-y dibutuhkan nilai parameter

tanah asli seperti γ dan ϕ , sehingga dapat terjadi sedikit perbedaan nilai momen hasil analisa numerik dengan metode kurva p-y dan hasil uji laboratorium.

3. Defleksi maksimum tiang terjadi pada permukaan tanah dengan jarak titik putar rata-rata.
4. Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan metode kurva p-y, momen maksimum terjadi pada jarak $L/3$ dari permukaan tanah dan pada dasar tiang momen yang terjadi adalah nol.
5. Berdasarkan hasil perbandingan tersebut, maka rumusan untuk menentukan kapasitas momen maksimum pada perencanaan pondasi tiang pendek silindris dapat digunakan, dengan mengusulkan faktor keamanan sebesar 2 untuk menyetarakan nilai hasil perhitungan dalam metode kurva p-y.

Daftar Pustaka

- Kreyszig, E. *Advanced Engineering Mathematics Library of Congress Catalog in Publication Data*. United State of America.
- Murchison, J.M. dan O'neil M.W. *Evaluation of p-y Relationships in Cohesionless Soil*. Associate Professor of Civil Engineering Bradley University. Bradley.
- Reese Lymon C. Cox, William R dan Koop Francis D. *Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand*. Offshore Technology Conference. Texas.
- Reese Lymon. C dan Co William R. *Soil Behaviour from Analysis of Test of Uninstrumented Piles Under Lateral Loading*. American Society for Testing and Meterials.
- Tomlinson. M.J. *Pile Design and Construction Practice*. The Garden City Press Limited Letchworth, Hertfordshire.