

SIMULASI RESPON PONDASI TIANG PANCANG AKIBAT PEMBEBANAN LATERAL MENGGUNAKAN METODE BEDA HINGGA

Ahmad Fitri Sujatmiko

tenaga ahli PT Surya Unggul Nusa Consultan, Madiun
miko_umm@yahoo.com

ABSTRACT

Structural response of concrete of pillar commonly happened from the result of in site test through loading test. But, the test needs large amount. So, it is suggested to use an efficient analysis method through simulation of numeric model. A model of pillar on the homogeny land will be loaded by a horizontal weight. By considering strengthen of the pillar and the reaction of the ground, to solve the accountability can be done by using finite differences method. For example, for a concrete of pillar 30x30cm with a lateral weight 1000kg are have lendutan response $y_{maks}=42\text{mm}$, while the maximum moment response $M_{maks}=780\text{kg.m}$

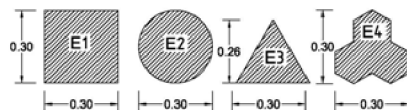
Keyword: concrete response, lateral weight, finite differences method.

PENDAHULUAN

Untuk mengetahui respon struktur pondasi tiang pancang, dapat dilakukan dengan serangkaian test pembebanan (*loading test*) secara eksperimental atau dengan simulasi model matematis.

Dalam studi ini, akan difokuskan pada kajian hipotetik simulasi model pondasi tiang pancang dalam menerima beban lateral menggunakan metode beda hingga (*finite difference method*). Untuk menyelesaikan formulasi persamaan numeris, digunakan program bantu spreadsheet MS Excel.

Dengan pendekatan simulasi model numerik ini, akan diperoleh respon pondasi tiang pancang berupa lendutan (y) dan momen (M) pada tiap kedalaman yang sudah ditentukan. Akan dikaji pula perilaku respon pondasi tiang pancang untuk berbagai bentuk penampang sebagaimana pada gambar berikut:



Gambar 1. Penperilaku respon pondasi tiang pancang

Dari kajian ini diharapkan menjadi referensi praktis bagi para insinyur dan akademisi untuk mengetahui respon pondasi tiang pancang yang telah dirancangnya secara analitis.

METODELOGI PENELITIAN

Pondasi tiang pancang yang akan dikaji merupakan pondasi minipile dari beton dengan mutu $f_c=20\text{MPa}$. Nilai modulus elastisitasnya sesuai dengan SNI 03-2847-2002 (Tata Cara Perhitungan Struktur Beton) adalah sebesar $E=47000\text{MPa}$.

Adapun momen inersia disesuaikan dengan berbagai bentuk penampang yang ada. Selengkapnya disajikan pada table berikut.

Dari konsep pondasi WINKLER, reaksi tanah diidealisasi sebagai titik-titik pegas yang bekerja di sepanjang balok tiang pancang. Sebagai contoh, balok tiang pancang dibagi menjadi 4 elemen dengan 5 node sejarak h yang konstan seperti pada gambar 2 berikut.

Tabel 1. Momen inersia penampang

Penampang pondasi	Inersia
E1=segi empat	$\frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3$
E2=Lingkaran	$\frac{1}{2} \cdot r \cdot r^3$
E3=Segi tiga	$\frac{1}{36} \cdot b \cdot h^3$
E4=tripod	$\sum \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3$

Pada studi ini, tanah disekitar pondasi dimodelkan sebagai system pegas (*spring*) dengan kekakuan k_s , menggunakan teori WINKLER mengenai ekuivalen pegas. Tanah tersebut merupakan tanah homogen dengan nilai koefien tanah dasar yang seragam di setiap lapisan tanah. Dari penelitian Hari Cristadi (2009), diperoleh nilai modulus tanah dasar $k_s=4993\text{KN/m}^3$.

Metode Beda Hingga

Pondasi tiang pancang diidealisasikan sebagai sebuah balok sepanjang sumbu x dengan penampang yang konstan disepanjang balok. Pada ujung tiang diberi beban lateral (P) pada arah sumbu y . Perpindahan pada arah sumbu y adalah y_i dan momen lentur adalah M_i . Dari teori mekanika bahan didapat persamaan:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -M \quad \dots (1)$$

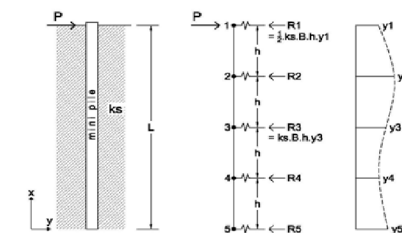
Dengan menggunakan formulasi beda hingga diferensial orde 2, Chapra (1991), dimana dx adalah h , persamaan (1) dapat ditulis lagi sebagai berikut Bowles (1975);

$$\frac{EI}{h^2} (y_{n-1} - 2y_n + y_{n+1}) = -M \quad \dots (2)$$

$$\frac{EI}{h^2} = C \quad \dots (3)$$

$$C(y_{n-1} - 2y_n + y_{n+1}) = -M \quad \dots (4)$$

Dari konsep pondasi WINKLER, reaksi tanah diidealisasi sebagai titik-titik pegas yang bekerja di sepanjang balok tiang pancang. Sebagai contoh, balok tiang pancang dibagi menjadi 4 elemen dengan 5 node sejarak h yang konstan seperti pada gambar 2 berikut.



Gambar 2. Model permasalahan

Adapun reaksi tanah di sepanjang balok tiang pancang pada node beda hingga adalah sebagai berikut;

$$R_1 = 1/2 k_s \cdot B \cdot h \cdot y_1 \quad \dots (5)$$

$$R_2 \text{ sampai } R_4 = k_s \cdot B \cdot h \cdot y_i \quad \dots (6)$$

$$R_5 = 1/2 k_s \cdot B \cdot h \cdot y_5 \quad \dots (7)$$

Dimana;

R_i = Reaksi tanah pada tiap node

k_s = modulus tanah dasar

B = Lebar pondasi tiang pancang

h = Jarak tiap node

y_i = perpindahan tiap node

Selanjutnya adalah mengurai reaksi tiap node berdasarkan kesetimbangan gaya " $M=0$ dan " $F=0$ ". Berdasarkan persamaan (4) maka reaksi pada tiap node seperti pada persamaan berikut;

$$\text{Node 2, "M}_2=0 \\ C(y_1 - 2y_2 + y_3) + R_1 \cdot h - P \cdot h = 0 \quad \dots (8)$$

$$\text{Node 3, "M}_3=0 \\ C(y_2 - 2y_3 + y_4) + R_1 \cdot 2h + R_2 \cdot h - P \cdot 2h = 0 \quad \dots (9)$$

$$\text{Node 4, "M}_4=0 \\ C(y_3 - 2y_4 + y_5) + R_1 \cdot 3h + R_2 \cdot 2h + R_3 \cdot h - P \cdot 3h = 0 \quad \dots (10)$$

$$\text{Node 5, "M}_5=0 \\ R_1 \cdot 4h + R_2 \cdot 3h + R_3 \cdot 2h + R_4 \cdot h - P \cdot 4h = 0 \quad \dots (11)$$

" $F=0$

$$R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 - P = 0 \quad \dots (12)$$

Dari persamaan (8) sampai (12) akan didapat kan 5 persamaan simultan dengan 5 variabel (y_i) yang belum diketahui. Penyelesaian dari persamaan ini menggunakan metode matrik sebagai berikut.

$$[A] \times \{y_i\} = \{B\} \quad \dots (13)$$

Atau

$$\{y_i\} = [A]^{-1} \times \{B\} \quad \dots (14)$$

Dimana;

$[A]$ = matrik konstanta lendutan (y_i)

$[A]^{-1}$ = matrik invers konstanta lendutan (y_i)

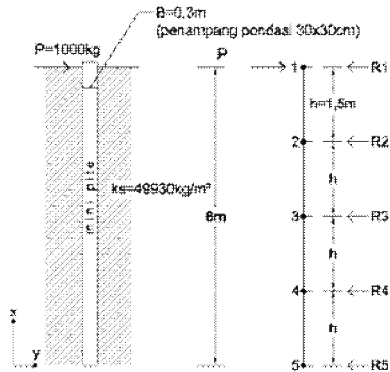
$\{y_i\}$ = vektor lendutan (y_i) pada tiap node

yang akan dicari
 $\{B\}$ = vektor konstanta persamaan

Setelah nilai lendutan (y) diketahui pada masing-masing node, dengan menggunakan persamaan (4) akan diperoleh Momen pada tiap node (M_i).

Tabel 2. Data perhitungan

Data perhitungan :							
E_{conc}	2101903899 kg/m ²						
I	0,000675 m ⁴	647422,54 y_1	-1261142 y_2	630571,17 y_3	0 y_4	0 y_5	= 1500
h	1,5 m	33702,75 y_1	664273,92 y_2	-1261142 y_3	630571,17 y_4	0 y_5	= 3000
$C=EI/h^2$	630571,1697 kg	50554,125 y_1	67405,5 y_2	664273,92 y_3	-1261142 y_4	630571,17 y_5	= 4500
k	49930 kg/m ²	67405,5 y_1	101108,25 y_2	67405,5 y_3	33702,75 y_4	0 y_5	= 6000
B	0,3 m	11234,25 y_1	22468,5 y_2	22468,5 y_3	22468,5 y_4	11234,25 y_5	= 1000
P	1000 kg						



Gambar 3. Pemodelan permasalahan

Langkah pertama adalah menghitung reaksi tanah (R_i) pada tiap node yang sudah ditentukan.

Tabel 3. Perhitungan reaksi tanah (R_i)

Perhitungan Reaksi (R_i)		
R_1	0,5 . K . B . h . y_1	11234,25 y_1
R_2	k . B . h . y_2	22468,5 y_2
R_3	k . B . h . y_3	22468,5 y_3
R_4	k . B . h . y_4	22468,5 y_4
R_5	0,5 . K . B . h . y_5	11234,25 y_5

Pada kasus ini, digunakan pondasi tiang dengan penampang bujur sangkar 30x30cm sedalam 6m dari permukaan tanah. koefisien tanah di sekitar pondasi tiang adalah 49930 Kg/m². Beban lateral (P) yang bekerja pada kepala tiang sebesar 1000kg. Data selengkapnya disajikan seperti berikut;

Langkah selanjutnya adalah memasukkan data yang sudah diketahui ke dalam persamaan (8) sampai (12) seperti pada contoh perhitungan sebagai berikut.

Persamaan (8) pada node 2, $SM_2=0$

$$C(y_1 - 2y_2 + y_3) + R_1 \cdot h - P \cdot h = 0$$

$$630571,2(y_1 - 2y_2 + y_3) + 11234,25y_1 \cdot 1,5 - 1000 \cdot 1,5 = 0$$

$$647422,5 y_1 - 1261142,3 y_2 + 630571,2 y_3 = 1500$$

Tabel 4. persamaan simultan tersebut disederhanakan menjadi bentuk matrik sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 647422,54 & -1261142 & 630571,17 & 0 & 0 \\ 33702,75 & 664273,92 & -1261142 & 630571,17 & 0 \\ 50554,125 & 67405,5 & 664273,92 & -1261142 & 630571,17 \\ 67405,5 & 101108,25 & 67405,5 & 33702,75 & 0 \\ 11234,25 & 22468,5 & 22468,5 & 22468,5 & 11234,25 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1500 \\ 3000 \\ 4500 \\ 6000 \\ 1000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dengan menggunakan bantuan software spreadsheet MS Excel akan diperoleh nilai y_i dalam bentuk vector matrik sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,04214161 \\ 0,02561637 \\ 0,01034375 \\ -0,00379282 \\ -0,01746271 \end{bmatrix}$$

Setelah didapat nilai lendutan (y) pada tiap node, maka dengan persamaan (4) akan diperoleh nilai momen (M) di tiap node juga.

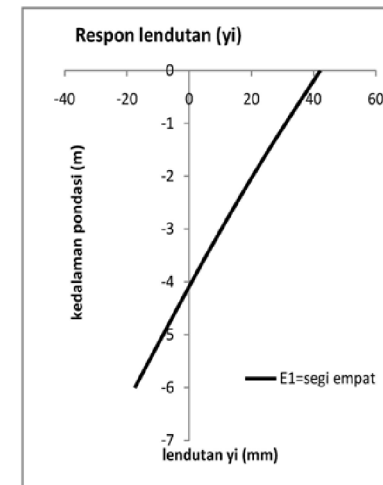
Selanjutnya dengan langkah perhitungan seperti pada contoh di atas, maka bisa disimulasi berbagai bentuk profil penampang tiang pancang terhadap respon lendutan dan momen yang terjadi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil perhitungan, didapatkan respon lendutan dan momen tiap node yang disajikan dalam table dan grafik berikut

Tabel 5. Kedalaman pondasi dan lendutan

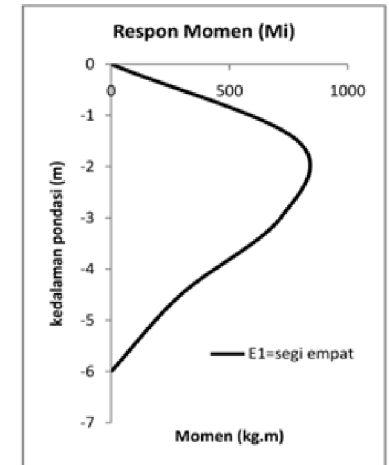
Kedalaman (m)	0	1,5	3	4,5	6
Lendutan (mm)	42,14161	25,61637	10,34375	-3,79282	-17,4627



Gambar 4. Grafik hubungan kedalaman-lendutan

Tabel 6. Kedalaman pondasi dan lendutan

Kedalaman (m)	0	1,5	3	4,5	6
Momen (kg.m)	0	789,856	716,3697	294,2706	0



Gambar 5. Grafik hubungan kedalaman-momen

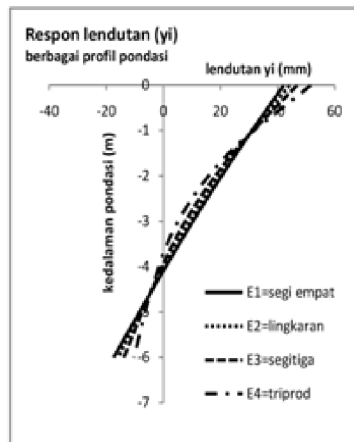
Dari hasil simulasi terlihat bahwa lendutan maksimum akibat beban lateral sebesar 1000kg adalah sebesar 42mm. Sedangkan momen maksimum yang terjadi adalah sebesar 780kg.m pada kedalaman 1,5m dari permukaan tanah.

Pembahasan selanjutnya adalah membandingkan respon lendutan dan momen berbagai bentuk profil penampang tiang pancang. Dengan langkah perhitungan analog dengan perhitungan untuk profil penampang segi empat diatas, maka hasil simulasi untuk profil yang lainnya disajikan dalam tabel dan grafik berikut.

Dengan membandingkan berbagai profil penampang tiang pancang, akan diketahui hubungan antara kekakuan (EI) dan respon struktur.

Tabel 7. Kedalaman pondasi dan lendutan berbagai

kedalaman (m)	Lendutan (mm)			
	E1	E2	E3	E4
0	42,14161	44,17264	46,83369	51,63163
1,5	25,61637	25,07733	24,33769	22,88784
3	10,34375	9,177554	7,685163	5,119304
4,5	-3,79282	-3,90537	-4,02377	-4,13838
6	-17,4627	-15,8582	-13,8184	-10,3557

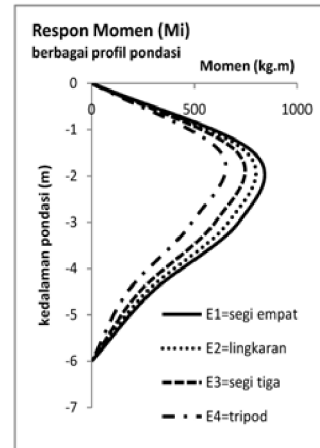


Gambar 6. Grafik hubungan kedalaman-lendutan berbagai penampang tiang pancang

Simpangan lendutan maksimum berbagai penampang tiang pancang adalah 51,6mm. Dari grafik terlihat bahwa semakin kecil kekakuan pondasi tiang pancang, maka respon lendutan membentuk fungsi lengkung.

Tabel 8. Kedalaman pondasi dan momen berbagai

kedalaman (m)	Momen (kg.m)			
	E1	E2	E3	E4
0	0	0	0	0
1,5	789,856	755,6302	710,7879	629,936
3	716,3697	666,0855	601,3286	488,4888
4,5	294,2706	267,232	232,8582	174,507
6	0	0	0	0



Gambar 7. Grafik hubungan kedalaman-momen berbagai penampang tiang pancang

Respon momen maksimum berbagai penampang tiang pancang adalah 780kg.m. Dari grafik terlihat bahwa semakin kecil kekakuan struktur (EI) respon momen yang terjadi juga semakin kecil.

KESIMPULAN DAN SARAN

1. Dari simulasi, pada pembebebanan lateral 1000kg respon lendutan maksimum sebesar 42mm dan momen maksimum sebesar 780kg.m.
2. Respon berbagai penampang tiang pancang dengan dimensi yang setara, salah satunya dipengaruhi oleh kekakuan struktur (EI). Semakin kecil kekakuan, respon lendutan membentuk fungsi lengkung sedangkan respon momen semakin kecil

DAFTAR PUSTAKA

- A. Avaei, Abdoul R. Ghotbi and M. Aryafar, 2008, Investigation of Pile- Soil Interaction Subjected to Lateral Loads in Layered Soils, American Journal of Engineering and Applied Sciences 1 (1): 76-81

Anonim, 2003, SNI 03-2847-2002 (Tata Cara Perhitungan Struktur Beton), Jakarta

Bowles, 1975, Solution to Beam on Elastic Foundation Using Finite Differences, Van Nostrand Reinhold Co., New York

Basu, D. and R. Salgado, 2007. Elastic analysis of laterally loaded pile in multi-layered soil. Journal Geomech. Geoen., 2(3): 183-196, doi:10.1080/1748 6020701401007.

Paulos and E H Davis, 1980, Pile Foundation Analisis and Design, John Wiley and Sons, New York.

Popov, E.P, 1984, Mekanika Teknik (ter-jemahan), Penerbit Erlangga, Jakarta

S. Chapra & RP Canale, 1991, Metode Numerik untuk Teknik (terjemahan), UI Press, Jakarta

Shen, W.Y. and C.I. Teh, 2004. Analysis of laterally loaded piles in soil with stiffness increasing with depth. J. Geotech. and Geoenviron. Eng., 130(8): 878-882, doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:8(878).

Ugural, A. C., and Fenster, S. K. ,1975, *Advanced Strength and Applied Elasticity*, Elsevier, New York

Yang, K. and R. Liang, 2006. Numerical solution for laterally loaded piles in a two-layer soil profile. Journal Geotech. and Geoenviron. Eng., 132(11):1436-443, doi:10.1061/(ASCE)10900241(2006)132:11(1436). Yang, Z. and B. Jeremi, 2002. Numerical analysis of pile behaviour under lateral loads in layered elastic-plastic soils, Int Journal Numeric Analysis Methods in Geomechanics, 26(14): 1385-1406, doi:10.1002/ nag.250