

PERENCANAAN FONDASI TIANG PANCANG GEDUNG KANTOR TAMAN WISATA CANDI YOGYAKARTA

Agus Susanto¹, Renaningsih², Qunik Wiqoyah³, Dhimas Adha Aji Putra⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Jl. A. Yani Tromol Pos 1 Pabelan Kartasura 57102 Telp 0271 717417

Email: as240@ums.ac.id

Abstrak

Proyek pembangunan Gedung Kantor Taman Wisata Candi Yogyakarta terdiri 7 lantai, 1 basement, dan 1 rooftop. Dari hasil penyelidikan tanah diketahui bahwa letak lapisan tanah keras pada kedalaman 22 meter dengan muka air tanah pada kedalaman 9 meter. Berdasarkan data tanah tersebut maka jenis fondasi yang cocok untuk gedung tersebut adalah fondasi tiang pancang. Direncanakan fondasi tiang pancang dengan diameter 0,3 m; 0,4 m; dan 0,5 m yang kemudian dipilih fondasi dengan diameter tiang yang mempunyai nilai efisiensi kelompok tiang tertinggi. Bertujuan untuk menghitung besar kapasitas dukung tiang tunggal, menghitung jumlah tiang pancang yang dibutuhkan, menghitung kapasitas dukung kelompok tiang, membuat desain penulangan pile cap, dan menghitung penurunan tiang. Kapasitas dukung tiang dianalisis dengan cara statis menggunakan prinsip kombinasi end bearing dan friction pile dengan metode Mayerhoff berdasarkan nilai N-SPT. Nilai kapasitas dukung tiang tunggal adalah sebesar 1366,455 kN pada diameter 0,3 m, 2158,124 kN pada diameter 0,4 m, dan 3083,772 kN pada diameter 0,5 m. Jumlah tiang yang dibutuhkan pada diameter 0,3 m sebanyak 15 tiang, diameter 0,4 m sebanyak 9 tiang, dan diameter 0,5 m sebanyak 8 tiang. Dipilih tiang yang mempunyai nilai efisiensi kelompok tiang tertinggi yaitu tiang dengan diameter 0,5 m dengan kapasitas dukung kelompok tiang sebesar 18354,611 kN. Dimensi pile cap 3 m x 6 m x 1,2 m dengan tulangan untuk menahan momen M_x sebesar D22-90 sedangkan untuk menahan momen M_y sebesar D22-70. Penurunan tiang yang terjadi sebesar $2,213 \text{ cm} \leq$ penurunan ijin tiang 5 cm sehingga aman.

Kata Kunci: *fondasi tiang pancang; kapasitas dukung tiang; metode Mayerhoff; penurunan tiang*

Pendahuluan

Proyek pembangunan Gedung Kantor Taman Wisata Candi Yogyakarta merupakan pengerjaan gedung 7 lantai, 1 basement, dan 1 rooftop. Dari hasil uji penyelidikan tanah diketahui bahwa lapisan tanah keras pada kedalaman 22 m dengan elevasi muka air tanah pada kedalaman 9 m. Dari data *geological drill log* diketahui bahwa tanah pada lokasi proyek adalah tanah pasir dengan jenis tanah pasir halus, pasir sedang, dan pasir kasar. Berdasarkan kondisi tanah yang demikian maka tipe fondasi yang cocok adalah fondasi tiang. Fondasi tiang terdiri dari dua tipe yaitu fondasi tiang bor dan fondasi tiang pancang. Agar lebih cepat dalam pelaksanaannya maka untuk gedung ini dipilih fondasi tiang pancang.

(5) penelitian tentang perencanaan ulang fondasi tiang pancang dengan variasi diameter, dimana salah satu metode yang digunakan adalah metode Meyerhoff. Analisis daya dukung tiang metode Meyerhoff ini berdasarkan data hasil pengujian *standard penetration test* berupa nilai N-SPT yang langsung digunakan tanpa dikoreksi. Padahal (1) dalam (2) menyarankan untuk mengoreksi nilai N dari lapangan dengan memperhatikan pengaruh prosedur pengujian, diameter lubang dan panjang batang bor. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian tentang perencanaan fondasi tiang pancang berdasarkan pada nilai N-SPT terkoreksi.

Tujuannya adalah untuk menghitung besar kapasitas dukung tiang tunggal berdasarkan nilai N-SPT terkoreksi, menghitung jumlah tiang pancang yang dibutuhkan, menghitung besar kapasitas kelompok tiang, membuat desain penulangan pada *pile cap*, dan menghitung penurunan tiangnya.

Metode Penelitian

Cakupan penelitian terbatas pada perencanaan fondasi tiang pancang dengan variasi diameter 0,3 m, 0,4 m, dan 0,5 m berdasarkan data hasil *standart penetration test*, *geological drill log*, dan data analisis struktur program SAP 2000. Jenis tanah pada lokasi proyek berupa lapisan tanah granuler yang terdiri dari pasir halus, pasir sedang, dan pasir kasar. Fondasi tiang pancang yang direncanakan merupakan fondasi yang mendukung kolom dengan beban aksial terbesar dengan faktor aman 2,5. Fondasi tiang pancang dipasang di bawah *basement* dari kedalaman 4,25 m sampai kedalaman 22 m menembus 9 lapisan pasir.

Tahapan dimulai dari pengumpulan data sekunder, meliputi data hasil pengujian SPT, gambar teknis dan data hasil analisis struktur dari output program SAP 2000. Tahap berikutnya menentukan titik fondasi yang menahan beban aksial kolom terbesar dari hasil analisis struktur. Selanjutnya menghitung kapasitas dukung fondasi tiang tunggal, menghitung jumlah tiang yang dibutuhkan untuk menahan beban maksimum, menghitung kapasitas dukung kelompok tiang, membuat desain penulangan *pile cap* dan menghitung penurunan tiang. Tahap terakhir adalah menyusun kesimpulan.

Kapasitas dukung tiang adalah kemampuan tiang dalam mendukung beban. Kapasitas dukung ultimit tiang dianalisis dengan cara statis dengan prinsip kombinasi *end bearing and friction pile* menggunakan metode Mayerhoff berdasarkan nilai N-SPT terkoreksi.

Kapasitas dukung ultimit netto (Q_u)

$$Q_u = Q_p + Q_s - W'_p \quad (1)$$

dengan

Q_u = kapasitas dukung ultimit netto tiang tunggal (kN)

Q_p = tahanan ujung ultimit (kN)

Q_s = tahanan gesek ultimit antara dinding tiang dan tanah sekitar (kN)

W'_p = berat efektif tiang (kN)

Tahanan ujung tiang (Q_p)

$$Q_p = 40 \cdot N_p \cdot A_p \quad (2)$$

dengan

Q_p = tahanan ujung satuan tiang (ton)

N_p = nilai N-SPT rata-rata pada elevasi dasar tiang pancang

$$N_p = \frac{(N_1 + N_2)}{2}$$

N_1 = nilai N-SPT pada kedalaman 4D dari ujung tiang ke atas

N_2 = nilai N-SPT pada kedalaman 1D dari ujung tiang ke bawah

A_p = luas penampang ujung bawah tiang (m^2)

Tahanan gesek ultimit tiang (Q_s)

$$Q_s = 0,2 \cdot N \cdot A_s \quad (3)$$

dengan

Q_s = tahanan gesek ultimit tiang (ton)

N = nilai rata-rata N-SPT sepanjang tiang

A_s = luas selimut tiang (m^2)

Nilai N-SPT dikoreksi terhadap efisiensi pemukul, pengaruh lubang bor, tabung sampler, dan batang bor.

Jumlah tiang (n)

Jumlah tiang yang diperlukan pada suatu titik kolom dihitung dengan membagi gaya aksial dengan daya dukung ijin tiang.

$$n = \frac{P}{Q_a} \quad (4)$$

dengan

n = jumlah tiang

P = gaya aksial (kN)

Q_a = Daya dukung ijin tiang (kN)

Efisiensi kelompok tiang (E_g)

Efisien kelompok tiang didefinisikan sebagai pengurangan daya dukung kelompok tiang yang disebabkan oleh *group action*. Menurut (3), salah satu persamaan pendekatan untuk mengestimasi efisiensi kelompok tiang adalah persamaan yang disarankan oleh "Converse-Labarre Formula" sebagai berikut:

$$E_g = 1 - \theta \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90mn} \quad (5)$$

dengan,

E_g = efisiensi kelompok tiang

θ = arc tg (D/s)

D = diameter penampang tiang

s = jarak antar tiang (as ke as)

m = jumlah tiang dalam 1 kolom

n = jumlah tiang dalam 1 baris

Kapasitas dukung kelompok tiang (Q_g)

Menurut (4), kapasitas dukung ultimit kelompok tiang dengan memperhatikan faktor efisiensi tiang dinyatakan dengan persamaan:

$$Q_g = E_g \times n \times Q_u \quad (6)$$

dengan

E_g = Efisiensi kelompok tiang

n = Jumlah tiang dalam kelompok

Q_u = Kapasitas dukung ultimit (kN)

Penurunan tiang (S)

$$S = S_s + S_p + S_{ps} \quad (7)$$

dengan

S = penurunan total

S_s = penurunan akibat deformasi aksial tiang

S_p = penurunan dari ujung tiang

S_{ps} = penurunan tiang akibat beban yang dialihkan sepanjang tiang

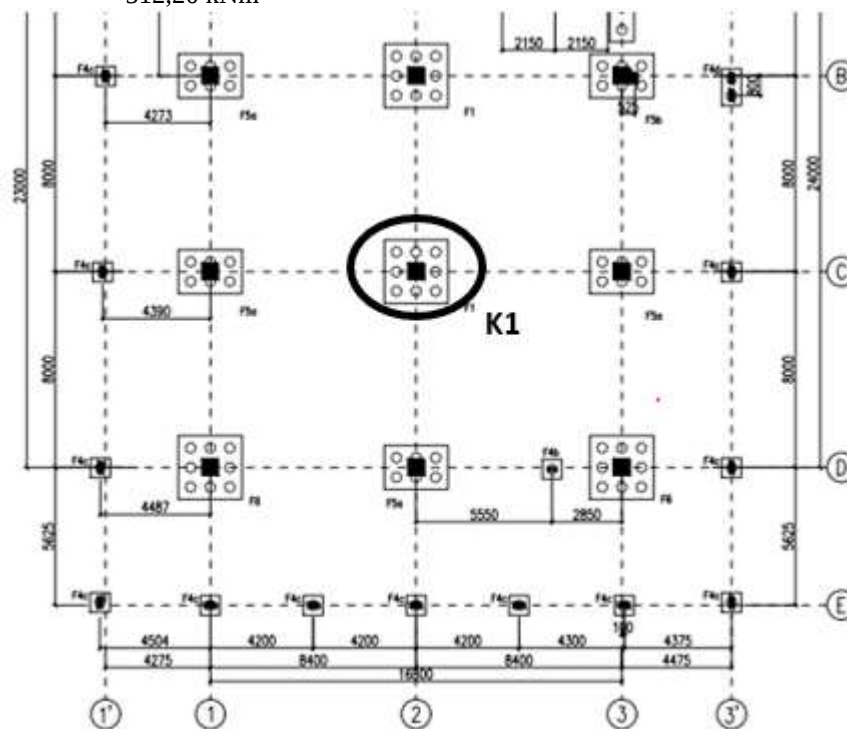
Hasil dan Pembahasan

Fondasi tiang yang direncanakan adalah fondasi yang menahan beban aksial kolom terbesar yaitu kolom K1 seperti pada Gambar 1 dengan data sebagai berikut :

P_u (beban aksial) = -7272,20 kN

M_x = 415,15 kNm

M_y = -512,20 kNm



Gambar 1. Letak fondasi dengan beban aksial kolom terbesar

Kapasitas dukung tiang tunggal diameter 0,5 m

Tahanan gesek tiang (Q_s)

Tiang pancang dipasang dari kedalaman 4,25 m sampai 22 m menembus 9 lapisan pasir yang terdiri dari lapisan pasir halus, pasir sedang, dan pasir kasar. Tahanan gesek tiang (Q_s) dihitung per lapisan pasir.

Lapisan 1 pasir kasar dari kedalaman 4,25 m sampai 6 m

$$A_s = \pi \cdot d \cdot t_s = \pi \cdot 0,5 \cdot 1,75 = 2,749 \text{ m}^2$$

$$N_{\text{rata-rata}} = \left(\frac{19+19}{2} \right) = 19$$

Koreksi terhadap nilai N-SPT

$$N_{60} = \frac{1}{0,6} \cdot E_f \cdot C_b \cdot C_s \cdot C_r \cdot N = \frac{1}{0,6} \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,85 \cdot 19 = 13,458$$

$$Q_{s1} = 0,2 \cdot N \cdot A_s$$

$$= 0,2 \cdot 13,458 \cdot 2,749 = 7,399 \text{ ton}$$

$$= 72,584 \text{ kN}$$

Kontrol terhadap tahanan gesek satuan maksimum ($f_s \leq 107 \text{ kN/m}^2$)

$$f_s = 0,2 \cdot 13,458 = 2,692 \text{ ton} = 26,409 \text{ kN/m}^2 \leq 107 \text{ kN/m}^2 \text{ (Memenuhi)}$$

Tahanan gesek pada lapisan 2 sampai lapisan 9 dihitung dengan cara yang sama sehingga diperoleh nilai

$$\begin{aligned} Q_s &= Q_{s1} + Q_{s2} + Q_{s3} + Q_{s4} + Q_{s5} + Q_{s6} + Q_{s7} + Q_{s8} + Q_{s9} \\ &= 72,584 + 185,998 + 51,944 + 186,498 + 69,779 + 167,261 + 81,757 + 56,653 + 176,188 \\ &= 1048,662 \text{ kN} \end{aligned}$$

Tahanan ujung tiang (Q_p)

$$A_p = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 = \frac{1}{4} \pi \cdot 0,5^2 = 0,196 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} N_b &= \frac{(N_1 + N_2)}{2} \\ &= \frac{(24,8 + 60)}{2} = 42,4 \end{aligned}$$

$$N_{60} = \frac{1}{0,6} \cdot E_f \cdot C_b \cdot C_s \cdot C_r \cdot N = \frac{1}{0,6} \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,85 \cdot 42,4 = 30,033$$

Kontrol terhadap tahanan ujung satuan maksimum ($f_b \leq 10700 \text{ kN/m}^2$)

$$\begin{aligned} f_b &= 40 \cdot 30,033 = 1201,32 \text{ ton (1 ton = 9,81 kN)} \\ &= 11784,949 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Karena $f_b > 10700 \text{ kN/m}^2$, maka digunakan tahanan ujung satuan maksimum $f_b = 10700 \text{ kN/m}^2$.

$$Q_p = A_p \cdot f_b = 0,196 \cdot 10700 = 2097,2 \text{ kN}$$

Kapasitas dukung ultimit netto (Q_u)

$$\begin{aligned} W'_p &= \frac{1}{4} \pi \cdot d^2 \cdot L \cdot (\gamma_{\text{beton}}) - \frac{1}{4} \pi \cdot d^2 \cdot L_{\text{terendam}} \cdot (\gamma_{\text{air}}) \\ &= \frac{1}{4} \pi \cdot 0,5^2 \cdot 17,75 \cdot (25) - \frac{1}{4} \pi \cdot 0,5^2 \cdot 13 \cdot (9,81) \\ &= 62,090 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$Q_u = Q_p + Q_s - W'_p = 2097,2 + 1048,662 - 62,090 = 3083,772 \text{ kN}$$

Kapasitas dukung ijin tiang (Q_a)

$$\begin{aligned} Q_a &= \frac{Q_u}{SF} \\ &= \frac{3083,772}{2,5} = 1233,509 \text{ kN} \end{aligned}$$

Jumlah tiang pancang yang dibutuhkan (n)

$$n = \frac{P}{Q_a} = \frac{7272,20}{1233,509} = 5,89 = 8 \text{ tiang}$$

Efisiensi kelompok tiang

$$\theta = \arctan d/s = \arctan 0,5/1,5 = 18,43^\circ$$

$$E_g = 1 - \theta \cdot \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90 \cdot m \cdot n} = 1 - 18,43 \cdot \frac{(4-1)2 + (2-1)4}{90 \cdot 2 \cdot 4} = 0,744$$

Daya dukung kelompok tiang

$$\begin{aligned} Q_g &= E_g \cdot n \cdot m \cdot Q_u \\ &= 0,744 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 3083,772 \\ &= 18354,611 \text{ kN} > P_u (7272,20 \text{ kN}) \text{ (OK)} \end{aligned}$$

Analisis kapasitas dukung tiang diameter 0,3 dan 0,4 dilakukan dengan cara seperti di atas sehingga diperoleh hasil sebagaimana terlihat pada tabel 1.

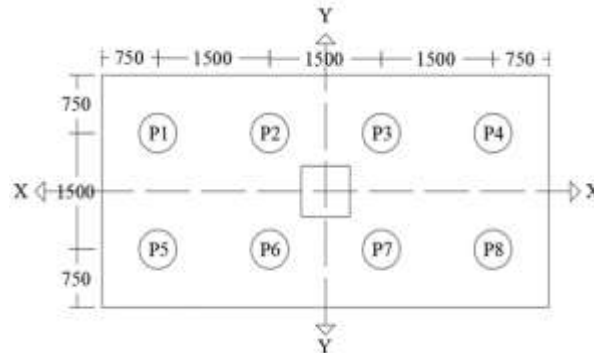
Tabel 1 Hasil analisis kapasitas dukung tiang tunggal (Q_u) dan kelompok tiang (Q_g)

Diameter (m)	Q_p (kN)	Q_s (kN)	W'_p (kN)	Q_u (kN)	n	E_g	Q_g (kN)
0,3	759,700	629,107	22,352	1.366,455	15	0,700	14.347,778
0,4	1.358,900	838,961	39,737	2.158,124	9	0,727	14.120,605
0,5	2.097,184	1.048,662	62,090	3.083,772	8	0,744	18.354,611

Dari hasil analisis kapasitas dukung tiang pancang dengan diameter 0,3 m, 0,4 m, dan 0,5 m maka dipilih kelompok tiang yang mempunyai nilai efisiensi kelompok tiang (E_g) tertinggi yaitu 8 tiang pancang dengan diameter 0,5 m. Daya dukung tiang hasil analisis berdasarkan nilai N-SPT terkoreksi memiliki nilai yang sedikit lebih kecil dibanding daya dukung tiang hasil analisis berdasarkan nilai N-SPT tanpa dikoreksi seperti pada penelitian (5). Meskipun nilainya lebih kecil namun lebih meyakinkan karena hasil uji SPT dipengaruhi oleh tipe alat yang digunakan, diameter lubang bor dan panjang batang bor, sehingga nilai N-SPT perlu dikoreksi.

Penulangan *pile cap*

Tulangan untuk menahan momen M_x



Gambar 2. Susunan kelompok tiang

Data perhitungan :

$$M_{ux} = \Sigma P_u \cdot l_y$$

$$\begin{aligned} \Sigma P_u \cdot l_y &= (P1 + P2 + P3 + P4) \cdot l_y \\ &= (1019,433 + 1002,360 + 985,286 + 968,213) \cdot 0,75 \\ &= 2981,469 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma P_u \cdot l_y &= (P5 + P6 + P7 + P8) \cdot l_y \\ &= (984,837 + 967,764 + 950,690 + 933,617) \cdot 0,75 \\ &= 2877,681 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Dipilih M_{ux} terbesar yaitu 2981,469 kN.m

$$\begin{aligned} K_{mak} &= \frac{382,5 \cdot \beta_1 \cdot f'_c \cdot (600 + f_y - 225, \beta_1)}{(600 + f_y)^2} \\ &= \frac{382,5 \cdot 0,8 \cdot 35 (600 + 400 - 225,0,8)}{(600 + 400)^2} \\ &= 8,7822 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$K = \frac{M_u}{\phi \cdot b \cdot d^2} = \frac{2981,469 \cdot 10^6}{0,9 \cdot 6000 \cdot 1114^2} = 0,4449 \text{ MPa}$$

Syarat : $K \leq K_{mak}$
 $0,4449 \text{ MPa} \leq 8,7822 \text{ MPa}$ (Memenuhi)

Menghitung tinggi tekanan tekan balok

$$a = \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2K}{0,85 \cdot f'_c}} \right) \cdot d = \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 0,4449}{0,85 \cdot 35}} \right) \cdot 1114 = 16,79 \text{ mm}$$

Menghitung luasan tulangan pokok perlu (A_s, u)

$$A_s = \frac{1,4}{f_y} \cdot b \cdot d = \frac{1,4}{400} \cdot 6000 \cdot 1114 = 23394 \text{ mm}^2$$

$$A_s = \frac{\sqrt{f'_c}}{4 \cdot f_y} \cdot b \cdot d = \frac{\sqrt{35}}{4 \cdot 400} \cdot 6000 \cdot 1114 = 24714,423 \text{ mm}^2$$

$$A_s = \frac{0,85 \cdot f'_c \cdot c \cdot a \cdot b}{f_y} = \frac{0,85 \cdot 35 \cdot 16,79 \cdot 6000}{400} = 7492,538 \text{ mm}^2$$

Dipilih yang terbesar $A_s, u = 24714,423 \text{ mm}^2$

Menghitung jarak antar tulangan (S)

Digunakan tulangan dengan diameter 22 mm

$$S = \frac{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot S}{A_s, u} = \frac{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 22^2 \cdot 6000}{24714,423} = 92,286 \text{ mm}$$

$$S = 2 \cdot h = 2 \cdot 1200 = 2400 \text{ mm}$$

$$S \leq 450 \text{ mm}$$

Dipilih nilai terkecil $S = 92,286 = 90 \text{ mm}$ atau dipasang tulangan D22-90.

Tulangan untuk menahan momen M_y

Data perhitungan :

$$M_{uy} = \Sigma P_u \cdot l_x$$

$$\begin{aligned} \Sigma P_u \cdot l_x &= (P1 + P5) \cdot l_x + (P2 + P6) \cdot l_x \\ &= (1019,433 + 984,837) \cdot 2,25 + (1002,360 + 967,764) \cdot 0,75 \\ &= 5987,201 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma P_u \cdot l_x &= (P4 + P8) \cdot l_x + (P3 + P7) \cdot l_x \\ &= (968,213 + 933,617) \cdot 2,25 + (985,286 + 950,690) \cdot 0,75 \\ &= 5731,100 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Dipilih M_{uy} terbesar yaitu 5987,201 kN.m

Dengan cara yang sama di atas maka diperoleh tulangan untuk menahan momen M_y adalah D22-70.

Penurunan tiang (S)

Penurunan akibat deformasi aksial tiang (S_s)

$$S_s = \frac{(Q_p + \alpha \cdot Q_s) \cdot L}{A_p \cdot E_p}$$

Data :

$$Q_p = 2097,2 \text{ kN}$$

$$Q_s = 1048,662 \text{ kN}$$

$$\alpha = 0,5$$

$$L = 17,75 \text{ m}$$

$$A_p = 0,196 \text{ m}^2$$

$$E_p = 4700 \cdot \sqrt{f'_c} = 4700 \cdot \sqrt{35} = 27805,575 \text{ Mpa}$$

$$= 27805,575 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$$

$$S_s = \frac{(2097,2 + 0,5 \cdot 1048,662) \cdot 17,75}{0,196 \cdot 27805,575 \cdot 10^3} = 8,538 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,854 \text{ cm}$$

Penurunan dari ujung tiang (S_p)

$$S_p = \frac{C_p \cdot Q_p}{d \cdot f_b}$$

Data :

$$C_p = 0,03$$

$$Q_p = 2097,2 \text{ kN}$$

$$d = 0,5 \text{ m}$$

$$f_b = 10700 \text{ kN/m}^2$$

$$S_p = \frac{0,03 \cdot 2097,2}{0,5 \cdot 10700} = 0,01176 \text{ m} = 1,176 \text{ cm}$$

Penurunan akibat pengalihan beban di sepanjang tiang (S_{ps})

$$S_{ps} = \frac{Q_p}{p \cdot L} \cdot \frac{d}{E_s} \cdot (1 - v_s^2) \cdot I_{ws}$$

Data :

$$Q_p = 2097,2 \text{ kN}$$

$$p = \pi \cdot d = \pi \cdot 0,5 = 1,571 \text{ m}$$

$$L = 17,75 \text{ m}$$

$$d = 0,5 \text{ m}$$

$$E_s = 75000 \text{ kN/m}^2$$

$$V_s = 0,325$$

$$I_{ws} = 2 + 0,35 \cdot \sqrt{\frac{L}{d}} = 2 + 0,35 \cdot \sqrt{\frac{17,75}{0,5}} = 4,09$$

$$S_{ps} = \frac{2097,2}{1,571 \cdot 17,75} \cdot \frac{0,5}{75000} \cdot (1 - 0,325^2) \cdot 4,09 = 0,001834 \text{ m} = 0,183 \text{ cm}$$

Penurunan total

$$S = S_s + S_p + S_{ps}$$

$$S = 0,854 + 1,176 + 0,183$$

$$= 2,213 \text{ cm}$$

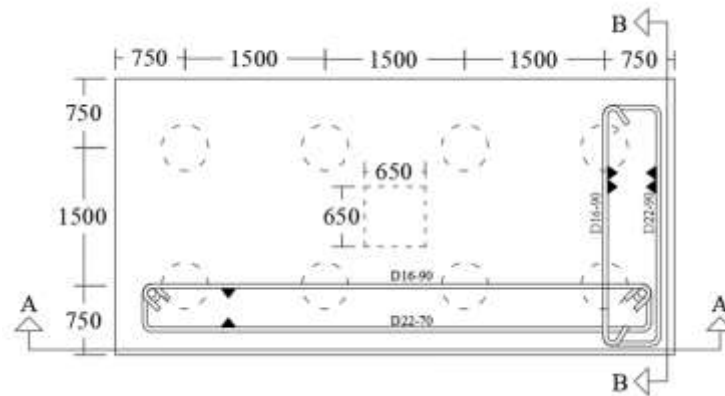
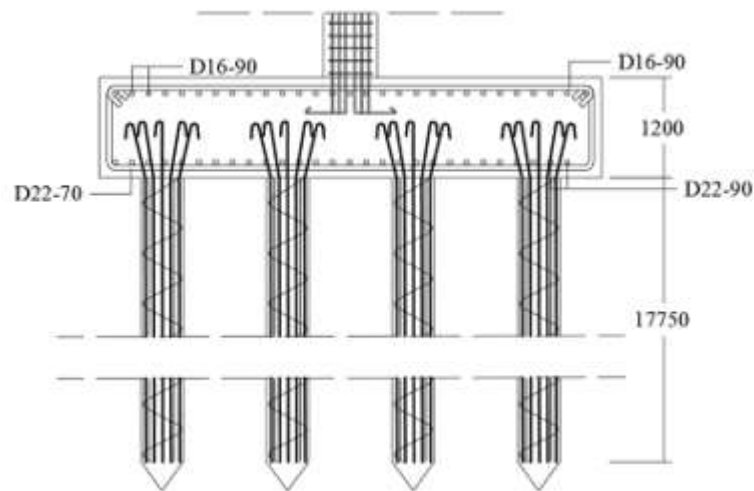
Penurunan fondasi tiang tunggal yang diijinkan (S_{ijin})

$$S_{total} \leq S_{ijin}$$

$$S_{total} \leq 10\% \cdot \text{diameter}$$

$$2,213 \leq 10\% \cdot 50$$

$$2,213 \leq 5 \text{ cm (aman)}$$

Gambar 3. Penulangan *pile cap*Gambar 4. Potongan A-A penulangan *pile cap*

Kesimpulan

1. Kapasitas dukung tiang tunggal adalah sebesar 1366,455 kN pada diameter tiang 0,3 m; sebesar 2158,124 kN pada diameter tiang 0,4 m; dan sebesar 3083,772 kN pada diameter tiang 0,5 m.
2. Jumlah tiang yang dibutuhkan untuk menahan beban aksial sebesar 7272,20 kN dengan diameter tiang 0,3 m sebanyak 15 tiang; pada diameter tiang 0,4 m sebanyak 9 tiang; dan pada diameter tiang 0,5 m sebanyak 8 tiang.
3. Kapasitas dukung kelompok tiang adalah sebesar 14347,778 kN pada diameter tiang 0,3 m; 14120,605 kN pada diameter tiang 0,4 m dan 18354,611 kN pada diameter tiang 0,5 m. Maka dipilih kelompok tiang dengan nilai efisiensi kelompok tiang tertinggi yaitu 8 tiang dengan diameter 0,5 m.
4. Dimensi *pile cap* 3 m x 6 m x 1,2 m dengan tulangan untuk menahan momen M_x sebesar D22-90 sedangkan untuk menahan momen M_y sebesar D22-70.
5. Penurunan tiang yang terjadi adalah sebesar 2,213 cm $\leq$ penurunan yang diijinkan sebesar 5 cm sehingga aman.

Daftar Pustaka

1. Skempton AW. Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. Available from: <https://doi.org/10.1680/geot.1986.36.3.425>
2. Hardiyatmo, Christady H. Analisis dan Perencanaan Fondasi I [Internet]. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press; 2011. Available from: <http://digilib.ub.ac.id/opac/detail-opac?id=67024>
3. Listyawan AB. Mekanika Tanah dan Rekayasa Pondasi. Surakarta: Muhammadiyah University Press; 2017.
4. Hardiyatmo HC. Analisis dan Perencanaan Fondasi II. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press; 2015.
5. Dirgananta MF. Perencanaan Ulang Fondasi Tiang Pancang dengan Variasi Diameter Menggunakan metode Meyerhoff, Aoki, De Elencar, dan Luciano Decourt [Internet]. Universitas Islam Indonesia; 2018. Available from: <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/6755>