

BAB IV
PERENCANAAN PONDASI TIANG PANCANG
BETON PRATEGANG

Untuk lebih memperjelas uraian yang telah diuraikan pada bab-bab terdahulu, berikut akan diberikan suatu aplikasi perencanaan pondasi tiang pancang beton prategang yang direncanakan untuk mendukung salah satu kolom dasar dari suatu konstruksi bangunan gedung. Pembahasan yang akan dilakukan antara lain meliputi perhitungan kapasitas dukung tanah serta kapasitas dukung penampang.

Perhitungan kapasitas dukung tanah dimaksudkan untuk mendapatkan panjang tiang yang akan menghasilkan kapasitas dukung tanah yang optimum. Dimensi penampang direncanakan berukuran $300 \times 300 \text{ mm}^2$. Untuk menghitung kapasitas dukung penampang, akan dicoba dengan menggunakan luas tulangan dan tata letak baja prategang yang berbeda-beda. Langkah-langkah perencanaan pondasi tersebut akan diuraikan sebagai berikut.

4.1 Gaya-gaya yang Terjadi

Gaya-gaya yang terjadi pada pondasi pada dasarnya merupakan gaya-gaya yang disalurkan oleh kolom dasar suatu

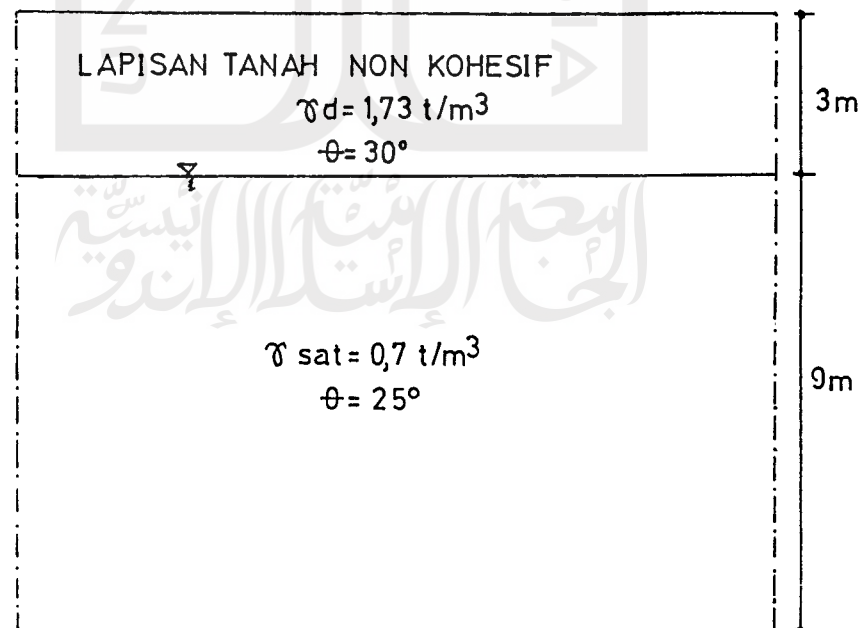
struktur bangunan yang diperoleh dari hasil perhitungan mekanika terhadap struktur bangunan tersebut. Pada perencanaan ini gaya-gaya yang bekerja pada pondasi direncanakan sebagai berikut:

1. beban aksial (V)= 350 Ton force (T_f),
2. momen arah x (M_x)= 30 $T_f.m$ dan momen arah y (M_y)= 20 $T_f.m$
3. gaya geser/lateral arah x (H_x) dan arah y (H_y) masing-masing sebesar 18 T_f .

4.2 Data Perencanaan

4.2.1. Data karakteristik tanah

Pada titik pemancangan pondasi tiang pancang, diketahui data sondir dan data karakteristik lapisan tanah pendukung (gambar 4.1) sebagai berikut.

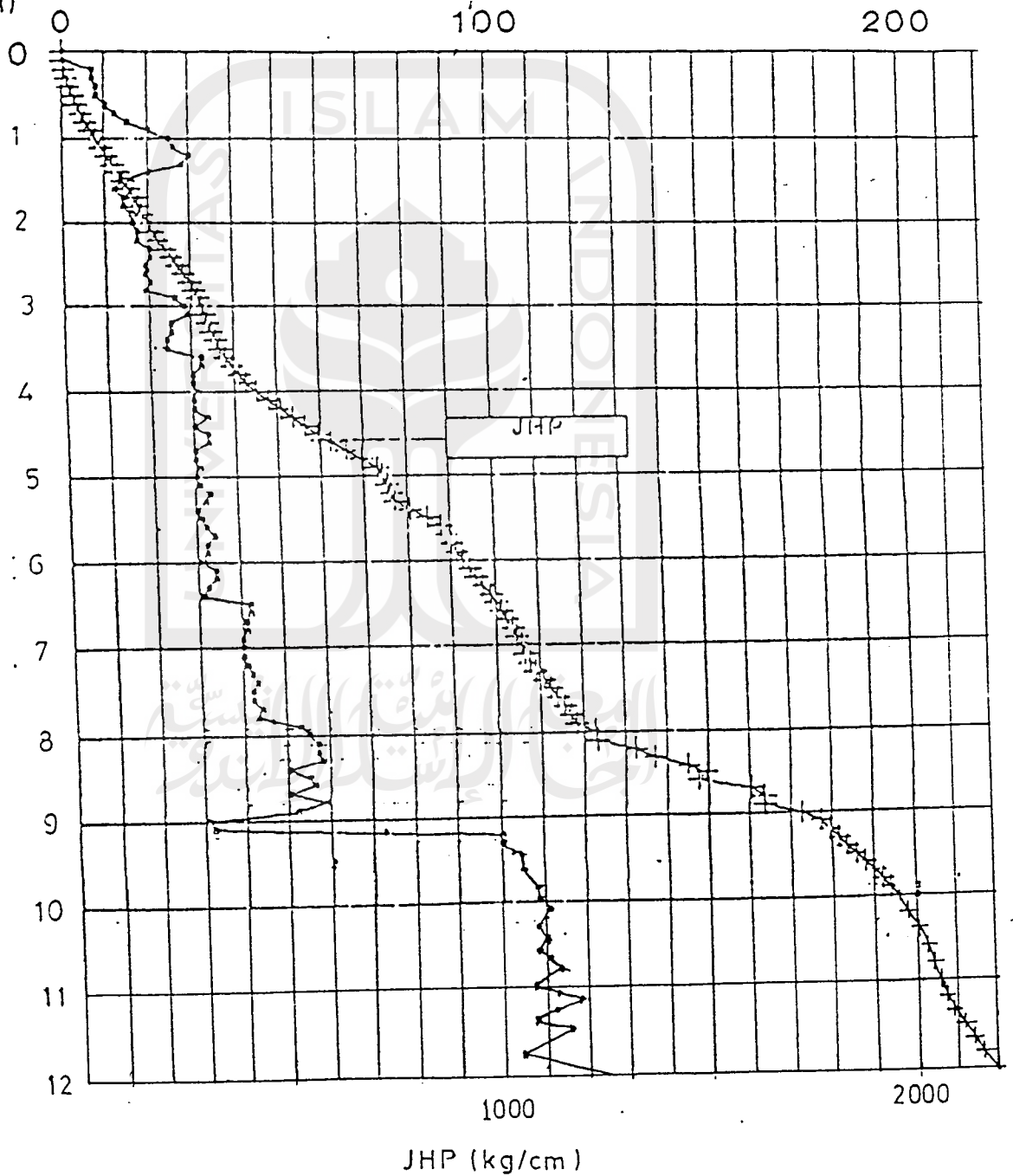


Gambar 4.1. Data karakteristik lapisan tanah pendukung pondasi

DATA SONDIR

KONUS (KG/CM²)

DALAM (M)



4.2.2. Data karakteristik struktur pondasi tiang pancang

Struktur pondasi tiang pancang beton prategang direncanakan menggunakan elemen penyusun struktur yang memiliki data karakteristik sebagai berikut:

1. kuat desak karakteristik beton (f'_c) = 40 Mpa
2. kuat tarik ultimit baja prategang (f_{pu}) = 1700 Mpa
3. kuat leleh baja prategang (f_{py}) = 1500 Mpa
4. modulus elastisitas baja prategang (E_p) = 200000 Mpa
5. regangan desak batas beton (ϵ_{cu}) = 0,003
6. regangan leleh baja prategang/"PC Wire" (ϵ_{py}) = 0,01

4.3 Perhitungan Distribusi Gaya dan Kapasitas Dukung Tanah pada Pondasi Tiang Pancang

4.3.1 Optimalisasi penentuan panjang tiang pancang berdasarkan kuat dukung tanah (tinjauan pendekatan)

Untuk menentukan panjang tiang pancang dapat dilakukan suatu pendekatan dengan membuat suatu perbandingan antara pertambahan panjang tiang pancang (ΔL) dengan pertambahan kuat dukung tanah (ΔP) dengan dimensi penampang yang sama. Perbandingan tersebut menunjukkan tingkat efisiensi akibat adanya penambahan panjang tiang pancang. Nilai yang terbesar dari perbandingan tersebut dapat dipakai untuk untuk menentukan panjang tiang pancang.

Berdasarkan data sondir, dicoba untuk menentukan kedalaman awal yang menjadi patokan dalam mencari hasil perbandingan tersebut. Dalam hal ini kedalaman awal tiang

pancang diambil 5 m. Langkah berikutnya adalah menentukan kuat dukung tanah (P) berdasarkan rumus (2.3). Hal yang sama juga dilakukan untuk setiap penambahan panjang tiang pancang.

$$P = \frac{A_p \cdot q_c}{SF1} + \frac{K \cdot q_f}{SF2}$$

$$RP1 = \frac{30+30+32+30+30+34+30+30}{8} = 30,72 \text{ kgf/cm}^2$$

$$RP2 = \frac{34+33+31+32}{4} = 32,5 \text{ kgf/cm}^2$$

$$q_c = \frac{RP1 + RP2}{2} = \frac{30,72+32,5}{2} = 31,63 \text{ kgf/cm}^2$$

$$q_f = 750 \text{ kgf/cm}^2$$

Dicoba dimensi penampang 30 x 30 cm , maka

$$P = \frac{30 \times 30 \times 31,63}{2} + \frac{4 \times 30 \times 750}{10} = 23,23 \text{ Tf.}$$

Untuk selanjutnya, perhitungan kapasitas dukung tanah dilakukan dengan cara menambah panjang tiang dengan interval sebesar 1 m sampai pada kedalaman yang diinginkan. Dengan cara seperti yang telah dijelaskan di atas, maka hasil perbandingan dihitung dalam bentuk tabel (4.1) sebagai berikut.

Tabel 4.1. Nilai efisiensi akibat pertambahan kapasitas dukung tanah dan pertambahan panjang tiang.

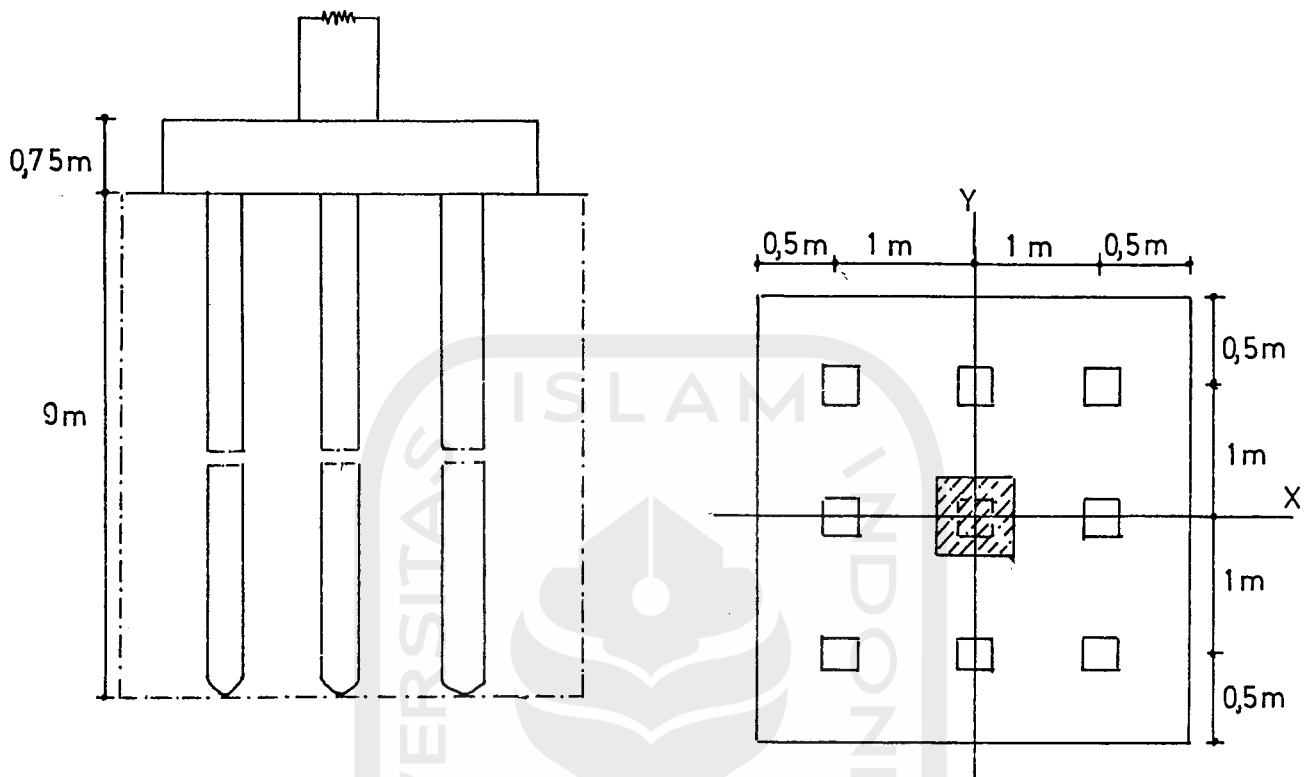
L(m)	P (Tf)	ΔL	$\Delta L(\%)$	ΔP	$\Delta P(\%)$	Efisiensi $\frac{\% \Delta P}{\% \Delta L}$
5	23,23	-	-	-	-	1
6	28,72	1	20	5,49	23,63	1,1
7	30,95	2	40	7,72	33,23	0,83
8	35,41	3	60	12,18	52,43	0,87
9	54,375	4	80	31,145	134	1,67
10	61,54	5	100	38,31	164,9	1,65
11	69,05	6	120	45,82	197,2	1,64

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, diperoleh kesimpulan bahwa tiang yang panjangnya 9 m memiliki nilai efisiensi terbesar. Artinya dengan penambahan panjang tiang tersebut, maka nilai kapasitas dukung tanah jauh lebih besar daripada yang semestinya.

4.3.2 Perhitungan distribusi gaya dan kapasitas dukung tanah

Salah satu keuntungan yang diperoleh dari pondasi kelompok tiang ialah bahwa susunan tiang bisa diubah-ubah dengan maksud untuk mendapatkan nilai distribusi gaya yang serendah mungkin, sehingga dapat menghasilkan perencanaan yang aman dan efisien. Sehubungan dengan permasalahan di atas, berikut akan dicoba tiga macam susunan/formasi kelompok tiang dengan jarak yang berbeda-beda.

Formasi pertama tiang pondasi direncanakan sebanyak 9 buah tiang, yang disusun dengan formasi sebagai berikut:



Gambar 4.2. Formasi pertama pada kelompok tiang

1. Distribusi beban aksial dan momen.

a. beban aksial total (V_t)

$$\text{beban aksial (V)} = 350 \text{ Tf}$$

$$\text{berat "pile cap"} = 1,2(0,3 \times 0,3 \times 2,4)$$

$$= 19,44 \text{ Tf}$$

$$\text{berat total (Vt)} = 369,44 \text{ Tf}$$

b. jumlah jarak kuadrat masing-masing tiang terhadap

pusat berat kelompok tiang

$$\Sigma x^2 = 6.(1)^2 = 6$$

$$\Sigma y^2 = 6.(1)^2 = 6$$

c. gaya yang diterima oleh masing-masing tiang (P)

$$P = \frac{Vt}{n} + \frac{My \cdot x}{\Sigma x^2} + \frac{Mx \cdot y}{\Sigma y^2}$$

$$\text{tiang A} - P = \frac{369,44}{5} + \frac{20 \cdot 1}{6} + \frac{30 \cdot 1}{6} = 49,38 \text{ Tf}$$

untuk tiang B, C, D, E, F, G, H, I, gaya yang diterima masing-masing tiang dilampirkan dalam bentuk tabel sebagai berikut.

Tabel 4.2. Gaya aksial setiap tiang pada formasi pertama

Tiang	P (Tf)
B	44,382
C	39,38
D	46,05
E	41,05
F	36,05
G	32,72
H	37,72
I	42,72

Untuk menentukan gaya aksial kelompok tiang yang baru, dicari dengan cara mengambil nilai P yang terbesar, kemudian dikalikan dengan jumlah tiang pada kelompok tiang tersebut. Berdasarkan ketentuan di atas, maka gaya aksial (Pk) yang bekerja pada kelompok tiang adalah,

$$P_k = 9 \times 49,38 = 444,42 \text{ Tf}$$

2. Kapasitas dukung tanah terhadap gaya aksial

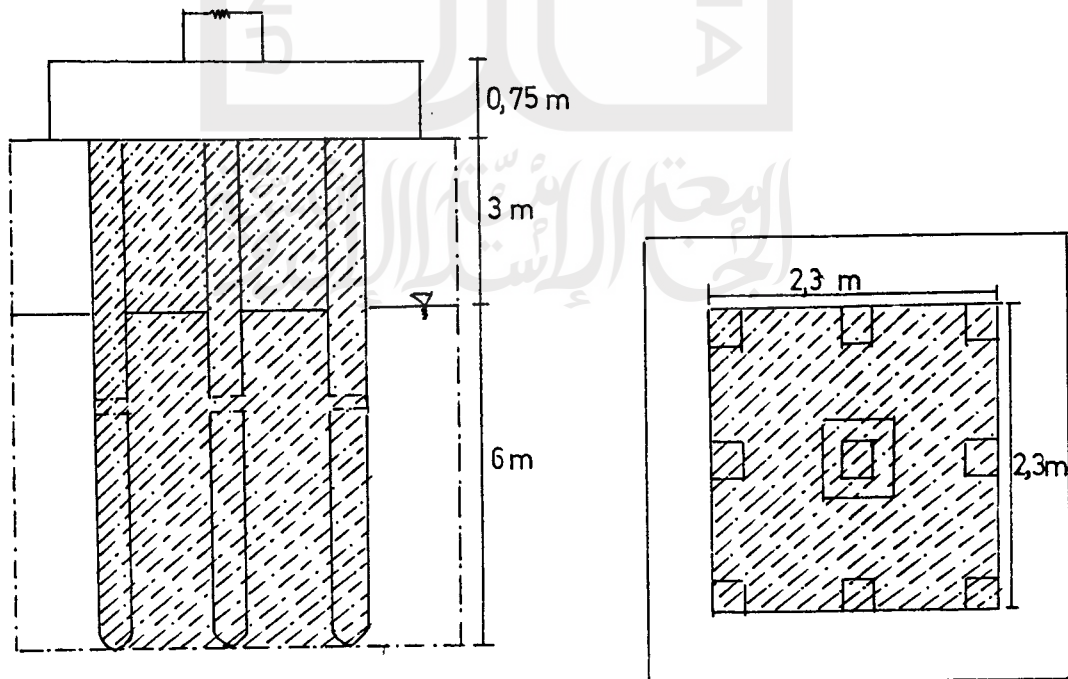
Untuk menghitung daya dukung tanah terhadap gaya aksial kelompok tiang dilakukan dengan dua tinjauan.

a. Kapasitas dukung tanah dihitung dengan cara mengalikan antara kapasitas dukung tanah untuk satu tiang

dengan jumlah tiang pada kelompok tiang tersebut. Pada kasus ini dicoba untuk menggunakan tiang pancang dengan ukuran $0,3 \times 0,3 \times 9$ m. Berdasarkan hasil perhitungan, kapasitas dukung tanah pada satu tiang (P) pada kedalaman 9 m adalah 54,379 Tf. Oleh karena itu kapasitas dukung tanah total (P_t) terhadap gaya aksial yang bekerja pada kelompok tiang dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} P_t &= (P \cdot n) - (\text{berat tiang}) \\ &= (54,375 \cdot 9) - (0,3 \times 0,3 \times 9 \times 2,4 \times 9) \\ &= 471,879 \text{ Tf} > 444,42 \text{ Tf} (P_k) - \text{Ok} \end{aligned}$$

- b. Kapasitas dukung tanah dihitung dengan cara menganggap bahwa kelompok tiang merupakan satu kesatuan dengan tanah sebagaimana ditunjukkan pada gambar sebagai berikut.



Gambar 4.3. Kelompok tiang sebagai satu kesatuan/blok

Berdasarkan gambar tersebut, maka dapat dihitung kapasitas dukung tanah (P_b) kelompok kelompok tiang sebagai berikut,

$$P_b' = \frac{A_p \cdot q_c}{SF1} + \frac{K \cdot q_f}{SF2}$$

$$= \frac{230 \cdot 230 \cdot 75,5}{2} + \frac{230 \cdot 4 \cdot 1700}{10} = 2153 \text{ Tf}$$

$$P_b = P_t' - (\text{berat tanah di bawah poer})$$

$$= 2153 - ((3 \times 2,3^2 \times 1,73) + (6 \times 2,3^2 \times 1,7))$$

$$= 2072 \text{ Tf} > P_k \rightarrow \text{Ok}$$

Berdasarkan kedua tinjauan, maka kapasitas dukung tanah yang digunakan adalah nilai yang paling kritis/terkecil, yaitu hasil dari tinjauan pertama dengan nilai kuat dukung tanah sebesar 471,879 Tf.

3. Distribusi gaya lateral

Gaya yang diterima oleh masing-masing tiang (H) akibat gaya lateral dihitung dengan cara membagi antara gaya lateral dengan jumlah tiang.

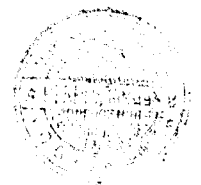
$$H_x = 18/9 = 2 \text{ Tf}$$

$$H_y = 18/9 = 2 \text{ Tf}$$

4. Kapasitas dukung tanah terhadap gaya lateral

Berdasarkan kriteria jenis tiang, maka tiang yang direncanakan termasuk jenis tiang panjang ($L/d > 12$). Tanah termasuk jenis non kohesif, sehingga penyelesaiannya menggunakan rumus (3.14).

$$H_a = \frac{2 \cdot M_y}{e + 0,55 \sqrt{\frac{H_a}{\phi \cdot d \cdot K_p}}}$$



Oleh karena tanah pendukung terdiri atas dua lapisan, maka nilai karakteristik tanah dihitung berdasarkan nilai rata-rata.

$$\theta = \frac{\theta_1 \cdot h_1 + \theta_2 \cdot h_2}{h_1 + h_2} = \frac{30 \cdot 3 + 25 \cdot 6}{3 + 6} = 26,7^\circ$$

$$\tau = \frac{\tau_1 \cdot h_1 + \tau_2 \cdot h_2}{h_1 + h_2} = \frac{1,73 \cdot 3 + 0,7 \cdot 6}{3 + 6} = 1,04 \text{ Tf/m}^3$$

$$K_p = \text{tg}^2(45 + \theta/2) = 2,52$$

Gaya yang diterima oleh masing-masing tiang adalah 1 ton, sedangkan nilai momen pada masing-masing tiang adalah 0. Berdasarkan kondisi tersebut, maka kapasitas dukung tanah terhadap gaya lateral (H_a) direncanakan sebesar 5 Tf ($> 2 \text{ Tf}$). Nilai H_a tersebut dikalikan dengan angka keamanan yang diambil sebesar 3, sehingga nilai H_a yang akan dimasukkan ke dalam persamaan menjadi 15 Tf . Hal ini berlaku untuk semua sumbu utama x dan y karena gaya lateral yang bekerja bernilai sama.

a. Arah x

$$15 = \frac{2 \cdot M_y}{0,75 + 0,55 \sqrt{\frac{15}{1,04 \cdot 0,3 \cdot 2,52}}}$$

dari persamaan di atas, diperoleh kapasitas dukung momen (M_y) sebesar $23,5 \text{ Tf} \cdot \text{m} > 0$. Berdasarkan kapasitas dukung tanah terhadap satu tiang tersebut, maka kapasitas dukung kelompok tiang terhadap gaya lateral diperoleh dengan cara mengalikan antara nilai

kapasitas dukung satu tiang dengan jumlah tiang kemudian dikalikan lagi dengan angka efisiensi yang diperoleh dari tabel (2.1). Penentuan angka efisiensi didasarkan atas perbandingan antara jarak antar tiang (S) dengan tebal tiang (B).

$$S/B = 1/0,3 = 3,33$$

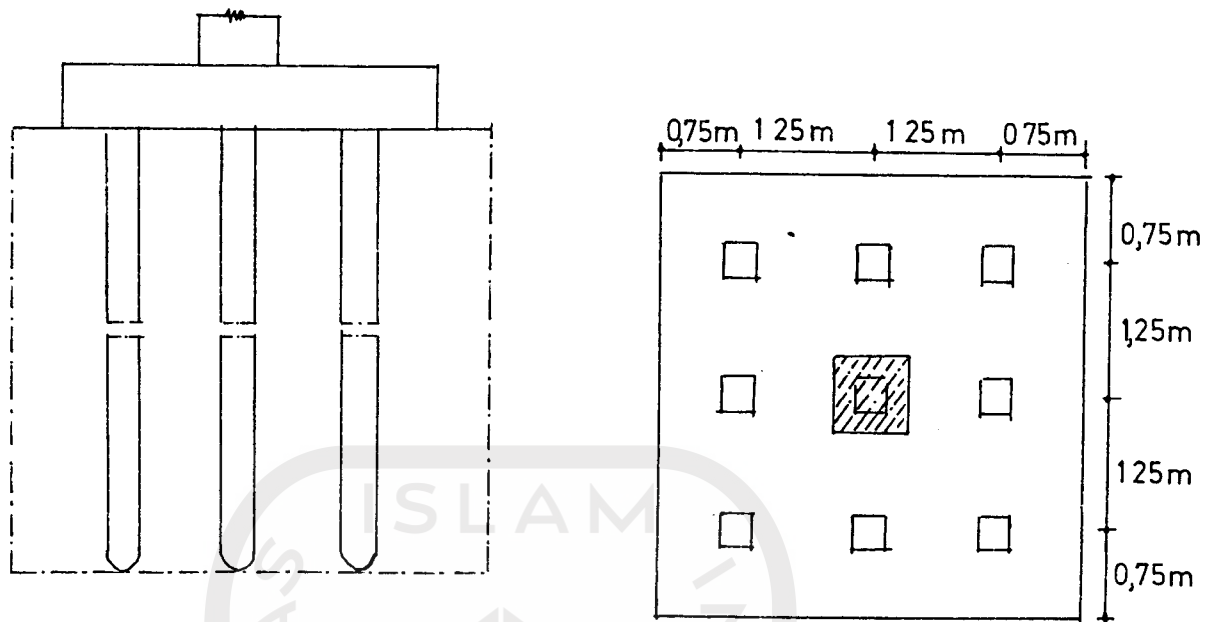
Berdasarkan tabel (2.1), diperoleh nilai efisiensi sebesar 0,53. Jadi daya dukung tanah terhadap gaya lateral adalah,

$$H_{\text{tot}} = 0,53 \times 5 \times 9 = 23,85 \text{ Tf} > 18 \text{ Tf} \rightarrow \text{Ok}$$

b. Arah y

Oleh karena gaya yang diterima sama seperti pada arah sumbu x, maka nilai kuat dukung tanah terhadap gaya lateral dan momen yang bekerja pada satu tiang juga direncanakan sama yaitu sebesar: $H_a = 5 \text{ Tf}$, dan $M_y = 23,5 \text{ tf.m}$. Untuk menentukan kapasitas dukung tanah total, karena memiliki jarak dan tebal tiang yang simetris dengan deret tiang pada sumbu x, maka dipakai nilai kapasitas dukung (H_{tot}) yang sama seperti pada arah sumbu x yaitu sebesar 23,85 Tf.

Penyusunan formasi kedua pada kelompok tiang, dilakukan dengan cara memperbesar jarak antar tiang sebesar 25 cm baik pada arah sumbu x maupun sumbu y seperti ditunjukkan pada gambar (4.4).



Gambar 4.4. Formasi kedua pada kelompok tiang

1. Distribusi beban aksial dan momen

beban aksial (V) = 350 Tf

berat "pile cap" = $1,2(0,4 \times 0,4 \times 0,75 \times 2,4) = 34,56$ Tf

berat total (V_t) = 384,56 Tf

Perubahan gaya yang terjadi hanya pada beban aksial sedangkan momen yang terjadi tidak mengalami perubahan. Perhitungan dilakukan dengan cara yang sama dengan sebelumnya. Gaya-gaya yang diterima oleh setiap tiang disusun dalam bentuk tabel (4.3)

Tabel 4.3. Gaya aksial setiap tiang pada formasi kedua

Tiang	P (Tf)
A	49,40
B	45,40
C	41,40
D	46,73
E	42,73
F	38,73
G	36,06
H	40,06
I	44,06

$$P_k = 9 \times 49,40 = 444,6 \text{ Tf}$$

2. Daya dukung tanah terhadap gaya aksial

Tiang pancang yang digunakan sama seperti yang digunakan pada tinjauan sebelumnya, oleh karena itu daya dukung tanah aksial yang direncanakan untuk kelompok tiang sama seperti tinjauan sebelumnya yaitu sebesar $471,879 \text{ Tf} > 444,6 \text{ Tf}$.

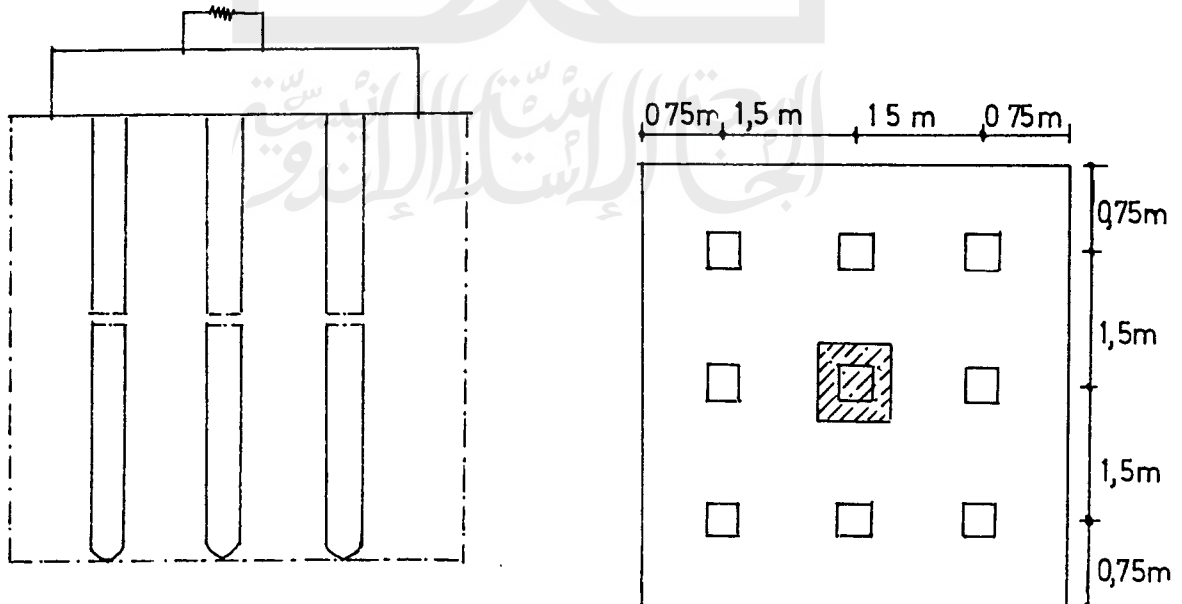
3. Daya dukung tanah terhadap gaya lateral

Daya dukung tanah terhadap gaya lateral untuk satu tiang direncanakan sama dengan tinjauan pertama yaitu sebesar 5 ton.

$$S/B = 1,25/0,3 = 4,2 \rightarrow \text{Efisiensi} = 0,62$$

$$H_x = H_y = 9 \times 5 \times 0,62 = 27,9 \text{ Tf} > 18 \text{ Tf}.$$

Pada susunan kelompok tiang yang ketiga, formasi tiang akan diubah dengan memperbesar jarak antar tiang (s) pada formasi kedua sebesar 25 cm sebagaimana dijelaskan pada gambar (4.4) berikut ini.



Gambar 4.5. Formasi ketiga kelompok tiang

1. Distribusi beban aksial

$$\text{beban aksial (V)} = 350 \text{ Tf}$$

$$\text{berat "pile cap"} = 1,2(4,5 \times 4,5 \times 0,75 \times 2,4) = 43,74 \text{ Tf}$$

$$\text{berat total (Vt)} = 393,74 \text{ Tf}$$

Gaya-gaya yang diterima oleh setiap tiang disusun dalam bentuk tabel sebagai berikut.

Tabel 4.4. Gaya aksial setiap tiang pada formasi ketiga

Tiang	P (Tf)
A	49,30
B	45,97
C	42,66
D	47,06
E	43,75
F	40,42
G	38,19
H	41,53
I	44,86

$$P_k = 9 \times 49,30 = 443,7 \text{ Tf}$$

2. Kapasitas dukung tanah terhadap gaya aksial

Berdasarkan hasil di atas, ternyata kapasitas dukung tiang sebesar 471,879 Tf masih lebih besar daripada gaya yang terjadi, sehingga tiang pancang aman.

3) Kapasitas dukung tanah terhadap gaya lateral

Distribusi gaya yang diterima oleh masing-masing tiang tidak dipengaruhi oleh jarak tiang, sehingga direncanakan kapasitas dukung tanah yang diijinkan untuk menahan gaya lateral sama dengan kapasitas dukung pada tinjauan pertama yaitu sebesar 5 Tf.

$$S/B = 1,5/0,3 = 5 \rightarrow \text{Efisiensi} = 0,68$$

$$H_x = H_y = 0,68 \times 5 \times 9 = 30,6 \text{ Tf} > 18 \text{ Tf}$$

Berdasarkan ketiga tinjauan formasi tiang di atas, maka susunan tiang yang menghasilkan gaya aksial maksimal (P_k) yang terkecil adalah formasi yang ketiga, sehingga formasi inilah yang dipakai dalam perencanaan.

4.4 Perencanaan Penampang Tiang Pancang Beton Prategang

4.4.1 Data Struktur

1. Beton

$$f'_c = 40 \text{ Mpa}$$

$$\epsilon_{cu} = 0,003$$

$$E_c = 4730, \sqrt{f_{c,c}} = 29.915,47 \text{ MPa}$$

2. Baja Prategang (PC Wire)

$$f_{pu} = 1700 \text{ MPa}$$

$$f_{py} = 1500 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{py} = 0,1$$

$$E_p = 200.000 \text{ MPa}$$

Poisson ratio:

$$n = \frac{E_p}{E_c} = \frac{200000}{29915,147} = 6,686$$

"Properties" penampang bruto:

$$A_c = 300^2 = 90000 \text{ mm}^2$$

$$I_c = 400^4/12 = 6,75 \cdot 10^9$$

$$C_t = C_b = 300/2 = 150 \text{ mm}$$

Panjang tiang:

$$L = 9000 \text{ mmm}$$

4.4.2 Rasio kelangsingan tiang

$$r = \sqrt{I/A} = \sqrt{(6,75 \cdot 10^8 / 90000)}$$

$$= 86,603 \text{ mm}$$

$$\frac{K.L}{r} = \frac{0,75 \cdot 9000}{86,603} = 77,942$$

Karena rasio kelangsingan tiang pancang melebihi 50, maka prosedur desain harus didasarkan pada kekuatan tiang di bawah kombinasi beban aksial dan momen (saat layan).

4.4.3 Gaya-gaya yang diterima tiang pancang

1. Momen yang terjadi saat pengangkatan (M_p)

Pada saat penanganan, akan timbul momen yang terjadi akibat berat sendiri tiang pancang,

$$Q_{bs} = 0,3 \cdot 0,3 \cdot 2,4 \cdot 1$$

$$= 0,216 \text{ Tf/m}$$

$$M_{bs} = (1/8) \cdot Q_{bs} \cdot L^2 = 1,5 \cdot 0,216 \cdot 9^2$$

$$= 2,187 \text{ Tf.m}$$

Momen di atas harus diberi kelonggaran terhadap tumbukan sebesar 50 %, maka,

$$M_p = 1,5 \cdot M_{bs} = 1,5 \cdot 8,748$$

$$= 3,2805 \text{ Tf.m}$$

2. Beban aksial yang diterima saat layan

Pada saat layan, beban yang diterima tiang pancang terdiri dari:

a. Beban aksial eksternal terfaktor = 49,30 Tf

b. Berat sendiri tiang pancang,

$$= 1,2 \cdot (0,3 \cdot 0,3 \cdot 9 \cdot 2,4) = 2,333 \text{ Tf}$$

$$\underline{\hspace{10em}} +$$

$$51,633 \text{ Tf}$$

Jadi total beban terfaktor yang diterima tiang pancang saat layan adalah 51,633 Tf.

3. Momen yang terjadi saat layan

Momen yang diterima didasarkan pada eksentrisitas minimum sebesar $(15+0,03.h)$ mm, dan dikalikan dengan faktor perbesaran momen (δ).

$$\begin{aligned}
 e_{\min} &= 15 + (0,03.h) = 15 + (0,03.30) \\
 &= 24 \text{ mm} = 0,024 \text{ m} \\
 M &= P \cdot e_{\min} = 51,633 \cdot 0,024 = 1,239 \text{ Tf.m} \\
 C_m &= 0,6 + 0,4 \cdot (M_1/M_2) = 0,6 + 0,4 \cdot 1 \\
 &= 1 \\
 P_{cr} &= \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot l)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 29915,147 \cdot 6,75 \cdot 10^8}{(0,75 \cdot 9000)^2} \\
 &= 4374083,9 \text{ N} \\
 &= 445,880 \text{ Tf} \\
 \delta &= \frac{C_m}{1 - (P_u / \phi \cdot P_c)} = \frac{1}{1 - 51,633 / (0,7 \times 445,880)} \\
 &= 1,198 \\
 M_c &= \delta \cdot M = 1,198 \times 1,239 \\
 &= 1,485 \text{ Tf.m}
 \end{aligned}$$

Jadi momen yang terjadi pada tiang pancang adalah 1,485 Tf.m

4.4.4 Tegangan-tegangan yang diijinkan

Berdasarkan ketentuan PCI (lihat tabel 3.1), maka tegangan-tegangan yang diijinkan pada tiang pancang yang direncanakan adalah sebagai berikut.

1. Tegangan tekan ijin (f_{ccu})

$$\begin{aligned} f_{ccu} &= 0,45 \cdot f'_c = 0,45 \cdot 40 \\ &= 18 \text{ MPa.} \end{aligned}$$

2. Tegangan tarik ijin (akibat lenturan)

a. Saat pengangkatan,

$$\begin{aligned} f_{ctu}' &= 0,5 \cdot \sqrt{f'_c} = 0,5 \cdot \sqrt{40} \\ &= 3,162 \text{ MPa.} \end{aligned}$$

b. Saat layan,

$$\begin{aligned} f_{ctu} &= 0,34 \cdot \sqrt{f'_c} = 0,34 \cdot \sqrt{40} \\ &= 2,15 \text{ MPa.} \end{aligned}$$

3. Tegangan prategang efektif

a. Nilai prategang efektif (f_{pse}) minimum untuk tiang pancang dengan panjang 9 m (< 12 m) adalah antara 2,8 sampai 4,9 MPa.

b. Tegangan prategang efektif pada baja (f_{pse}) maksimum adalah,

$$\begin{aligned} f_{pse1} &= 0,6 \cdot f_{pu} = 0,6 \cdot 1700 \\ &= 1020 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{pse2} &= 0,8 \cdot f_{py} = 0,6 \cdot 1500 \\ &= 1200 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Jadi, gaya prategang yang diijinkan adalah 1020 MPa.

4.4.5 Perencanaan tulangan prategang

$$\begin{aligned} A_{ps \text{ minimum}} &= 0,005 \cdot A_c = 0,005 \cdot 9000 \\ &= 450 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$A_{ps \text{ perlu}} = \frac{P_e \text{ min}}{f_{pse}} = \frac{f_{pse \text{ min}} \cdot A_c}{f_{pse}}$$

$$= \frac{4,9 \times 90000}{1020 \text{ mm}^2} = 432,233 \text{ mm}^2 < 450 \text{ mm}^2$$

Jadi, luas tulangan baja prategang yang diperlukan adalah 450 mm². Jika digunakan baja prategang jenis "Pretensioning Concrete Steel Wire", dengan diameter 7 mm, maka jumlah tulangan yang dibutuhkan adalah,

$$n = \frac{A_{ps \text{ min}}}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2} = \frac{450}{38,485} \\ = 11,693 \approx 12 \text{ buah.}$$

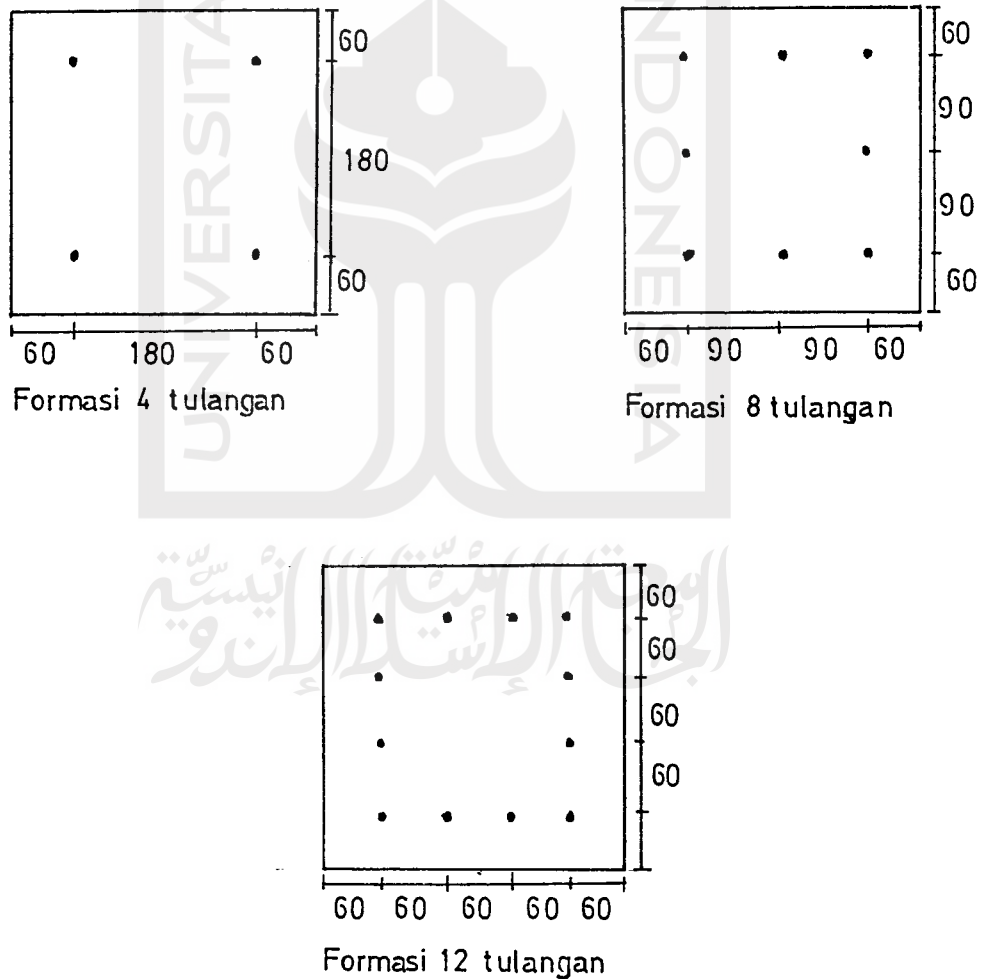
Untuk mendapatkan kebutuhan tulangan optimum yang menghasilkan kekuatan batas yang maksimum, serta aman terhadap beban-beban yang diterima, baik beban aksial, momen, maupun beban kombinasi, maka perlu dicoba beberapa variasi tulangan yang digunakan serta membandingkan kapasitas dukungnya.

Tujuan dari mencoba beberapa variasi tulangan tersebut adalah:

1. untuk mengetahui pengaruh perbedaan formasi tulangan terhadap kapasitas dukungnya,
2. untuk mengetahui pengaruh penambahan luas tulangan (kenaikan gaya prategang efektif) terhadap kapasitas dukungnya.

Untuk mengetahui pengaruh perbedaan formasi tulangan, maka perlu dibandingkan kapasitas dukung dari beberapa penampang yang memiliki total luas tulangan yang sama besar, namun berbeda jumlah, diameter, serta jarak antar tulangannya. Berdasarkan hal tersebut, maka akan dicoba penggunaan formasi tulangan: 12ø7, 8ø8,573, dan 4ø12,124. Selain hal diatas, perlu pula diketahui pengaruh penambahan

luas tulangan (kenaikan gaya prategang efektif) terhadap kapasitas dukungnya. Untuk itu, maka akan dicoba pula penggunaan berbagai diameter tulangan yang berbeda-beda, namun dalam jumlah yang sama, yaitu: 12 ϕ 7, 12 ϕ 8, 12 ϕ 9, 12 ϕ 10, 12 ϕ 11, 12 ϕ 12. Susunan dari tulangan yang dicoba dapat dilihat pada gambar (4.5).



Gambar 4.5. Susunan tulangan yang digunakan

Untuk selanjutnya, perhitungan properties penampang serta kontrol kapasitas terhadap gaya-gaya yang diterima, akan diuraikan berikut ini.

1). Perhitungan "properties" penampang transformasi dan nilai prategang efektif yang diperlukan

$$\text{Luas tulangan (Aps)} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2$$

$$\text{Aps total} = \Sigma \text{Aps} = 12 \cdot \text{Aps}$$

$$\text{Luas penampang transformasi (At)} =$$

$$A_c^2 + (n-1) \cdot \text{Aps total}$$

$$\text{Momen inersia penampang transformasi (It)} =$$

$$\left(\frac{1}{12}\right) \cdot b^4 + (n-1) \cdot \epsilon (\text{Aps} \cdot y^2)$$

$$\text{Nilai prategang efektif (fpe)} = \frac{P_e}{A_c} = \frac{\text{Aps} \cdot f_{pse}}{A_c}$$

Tabel 4.5 Nilai prategang efektif tiang pancang prategang

Diameter Tulangan (D)	Jumlah Tulangan (n)	Luas Tulangan (Aps)	Aps Total	Luas penampang Transformasi (At)	Momen inersia Transformasi (It)	Nilai Prategang Efektif
12,124	4	115,4535	461,8141	92625,8751	696341949,86	5,2339
8,573	8	57,7268	461,8141	92625,8751	690970292,93	5,2339
7	12	38,4845	461,8141	92625,8751	689967511,66	5,2339
8	12	50,2655	603,1858	93429,7144	694549399,15	6,8361
9	12	63,6173	763,4070	94340,7324	699742202,54	8,6519
10	12	78,5398	942,4778	95358,9288	705545927,81	10,6814
11	12	95,0332	1140,3981	96484,3039	711960568,96	12,9245
12	12	113,0973	1357,1680	97716,8575	718986128,00	15,3812

2. Kontrol kapasitas terhadap momen yang terjadi pada saat penanganan

$$\text{Momen yang terjadi (M}_p) = 3,2805 \text{ Tf.m}$$

$$\text{Kapasitas Momen (M')} = (f_{ctu}' + f_{pe}) \cdot I_t / C_t$$

Berdasarkan pada rumus di atas, maka kapasitas momen

untuk setiap variasi luas tulangan disusun dalam bentuk tabel sebagai berikut.

Tabel 4.6. Kapasitas Momen

Diameter Tulangan (D)	Jumlah Tulangan (n)	Momen Inersia Transformasi (It)	Nilai Prategang Efektif	Kapasitas Momen (M')	Keterangan
12,124	4	696341949,86	5,2339	3,4942	M' > Mp (Aman)
8,573	8	690970292,93	5,2339	3,4672	M' > Mp (Aman)
7	12	689967511,66	5,2339	3,3964	M' > Mp (Aman)
8	12	694549399,15	6,8361	4,7191	M' > Mp (Aman)
9	12	699742204,54	8,6519	5,6179	M' > Mp (Aman)
10	12	705545927,81	10,6814	6,7376	M' > Mp (Aman)
11	12	711960568,96	12,9245	7,7832	M' > Mp (Aman)
12	12	718986128,00	15,3812	9,0604	M' > Mp (Aman)

3. Kontrol kapasitas tiang terhadap beban yang bekerja saat layan

Pada saat layan, tiang pancang akan mengalami beban kombinasi antara beban aksial dan momen. Berdasarkan hasil perhitungan terhadap beban kombinasi, serta adanya pengaruh kelangsingan tiang yang menyebabkan adanya perbesaran momen dan eksentrisitas, maka nilai kapasitas penampang dapat dilihat pada gambar 5.3. Berdasarkan gambar (5.3), diperoleh nilai kapasitas ijin penampang yang disusun dalam tabel (4.7).

Tabel 4.7. Kapasitas beban aksial

Diameter Tulangan	Jumlah Tulangan	Kapasitas ijin Beban Aksial P' (Tf)	Keterangan
12,124	4	76	P' > P (Aman)
8,573	8	76	P' > P (Aman)
7	12	76	P' > P (Aman)
8	12	67	P' > P (Aman)
9	12	58	P' > P (Aman)
10	12	46,5	P' < P (Tidak Aman)
11	12	32,6	P' < P (Tidak Aman)
12	12	17,3	P' < P (Tidak Aman)

Berdasarkan hasil perhitungan kapasitas ijin dari delapan variasi tulangan yang telah dicoba, maka formasi tulangan yang memenuhi syarat adalah penampang dengan tulangan 4Ø12,124; 8Ø8,573; 12Ø7; 12Ø8; dan 12Ø9. Untuk lebih jelasnya, hasil-hasil perhitungan kapasitas diatas, akan dibahas pada bab 5.

4. Penentuan tulangan optimum

Berdasarkan grafik kapasitas penampang (gambar 5.3 dan 5.4), Nilai prategang yang paling optimum dan memenuhi syarat untuk tiang pancang berukuran 300 x 300 mm² dengan panjang 9m adalah 4,9 Mpa, sehingga

$$\begin{aligned}
 A_{ps_{opt}} &= \frac{f_{pe_{opt}}(A_c)}{f_{pse}} = \frac{4,9 \cdot 90000}{1020} \\
 &= 432,233 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Jika digunakan 4 buah tulangan prategang, maka diameter optimum adalah

$$\Sigma A_{ps} = 4\left(\frac{1}{4}\pi D^2\right)$$

$$\Rightarrow D = \sqrt{[A_{ps}/(4 \cdot \frac{1}{4}\pi)]}$$

$$= \sqrt{\left[\frac{432,233}{4 \cdot \frac{1}{4}\pi}\right]}$$

$$= 11,7296 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow 12 \text{ mm}$$

Jika digunakan 8 buah tulangan prategang, maka diameter optimum adalah

$$\Sigma A_{ps} = 8\left(\frac{1}{4}\pi D^2\right)$$

$$\Rightarrow D = \sqrt{[A_{ps}/(8 \cdot \frac{1}{4}\pi)]}$$

$$= \sqrt{\left[\frac{432,233}{8 \cdot \frac{1}{4}\pi}\right]}$$

$$= 8,294 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow 9 \text{ mm}$$

Jika digunakan 12 buah tulangan prategang, maka diameter optimum adalah

$$\Sigma A_{ps} = 12\left(\frac{1}{4}\pi D^2\right)$$

$$\Rightarrow D = \sqrt{[A_{ps}/(12 \cdot \frac{1}{4}\pi)]}$$

$$= \sqrt{\left[\frac{432,233}{12 \cdot \frac{1}{4}\pi}\right]}$$

$$= 6,772 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow 7 \text{ mm}$$

Jadi berdasarkan hasil perhitungan diatas, maka tulangan yang paling optimum adalah:

$$4\phi_{12}, \Sigma A_{ps} = 4(\frac{1}{4}\pi 4^2) = 452,398 \text{ mm}^2$$

$$8\phi_8, \Sigma A_{ps} = 8(\frac{1}{4}\pi 8^2) = 508,938 \text{ mm}^2$$

$$12\phi_7, \Sigma A_{ps} = 12(\frac{1}{4}\pi 12^2) = 461,814 \text{ mm}^2$$

Diantara ketiga susunan tulangan diatas, maka tulangan yang paling efisien adalah $4\phi_{12}$ sebab memiliki luas yang paling kecil, sehingga kapasitas beban aksialnya paling besar. Jadi pada perencanaan ini digunakan tulangan prategang $4\phi_{12}$, dengan nilai prategang efektif 4,9 Mpa.

