

## ANALISIS DAYA DUKUNG FONDASI BORED PILE PADA OVERPASS PROBOWANGI PAKET 2

Tri Mulyani Oktaviana<sup>1</sup>, Novita Anggraini<sup>2</sup>

Mahasiswa Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan Dan Jembatan, Jurusan Teknik Sipil<sup>1</sup>, Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang<sup>2</sup>

Email: [tmoktaviana@gmail.com](mailto:tmoktaviana@gmail.com)<sup>1</sup>, [novitaanggraini@polinema.ac.id](mailto:novitaanggraini@polinema.ac.id)<sup>2</sup>

### ABSTRAK

Overpass Simpang Susun Paiton merupakan bagian dari Proyek Pembangunan Jalan Tol Probolinggo – Banyuwangi Paket 2. Kondisi eksisting jembatan ini menggunakan struktur fondasi *bored pile*. Pada Pilar 2 dan 3 dengan kedalaman eksisting masing-masing yaitu 28 m dan 24 m. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis daya dukung tiang tunggal, daya dukung kelompok, penurunan total, penulangan fondasi *bored pile*, metode pelaksanaan serta Rencana Anggaran Biaya (RAB) berdasarkan data SPT dan data laboratorium. Analisis dilakukan dengan variasi kedalaman tiang yaitu 18 m; 20 m; 24 m dan variasi diameter 0,6 m; 0,8 m; 1,0 m. Perhitungan pembebanan struktur atas dilakukan menggunakan *software STAAD.Pro CONNECT Edition V22*, mengacu pada SNI 1725:2016 untuk pembebanan jembatan dan SNI 2833:2016 untuk pembebanan gempa. Metode perhitungan daya dukung tiang tunggal dengan metode *Mayerhof* (1976) dan *Vesic* (1977). Hasil analisis pada Pilar 2 lebih efisien dan efektif dengan desain menggunakan diameter 0,8 m di kedalaman 24 m dengan nilai daya dukung kelompok sebesar  $Q_{all(g)} = 48711,72$  kN serta jumlah tiang sebanyak 24 buah. Sementara analisis pada Pilar 3 lebih efisien dan efektif dengan desain menggunakan diameter 0,8 m di kedalaman 20 m dengan nilai daya dukung kelompok sebesar  $Q_{all(g)} = 42618,71$  kN. serta jumlah tiang sebanyak 32 buah. Penurunan yang terjadi memenuhi syarat izin dengan  $S_{g(e)} < S_{g(izin)}$  dengan nilai pada Pilar 2 sebesar 0,057 m dan Pilar 3 sebesar 0,119 m. Total Rencana Anggaran Biaya (RAB) yang dibutuhkan pada Pilar 2 sebesar Rp. 2.771.345.263,84 dan pada Pilar 3 sebesar Rp. 3.501.815.580,71.

**Kata kunci :** Jembatan, N-SPT, Fondasi Bored Pile, Daya Dukung, Penurunan

### ABSTRACT

The Paiton Interchange Overpass is part of the Probolinggo – Banyuwangi Toll Road Development Project Package 2. The existing bridge structure utilizes bored pile foundations. For Piles 2 and 3, the existing depths are 28 m and 24 m, respectively. This study aims to analyze the bearing capacity of single piles, group pile bearing capacity, total settlement, bored pile foundation reinforcement, construction methods, and the Bill of Quantity (BOQ), based on SPT and laboratory data. The analysis was conducted with variations in pile depth (18 m; 20 m; 24 m) and diameter (0.6 m; 0.8 m; 1.0 m). The calculation of the superstructure loading was performed using *STAAD.Pro CONNECT Edition V22* software, referencing SNI 1725:2016 for bridge loading and SNI 2833:2016 for earthquake loading. Single pile bearing capacity calculations employed the *Mayerhof* (1976) and *Vesic* (1977) methods. The analysis results indicate that for Pile 2, the most efficient and effective design uses a 0.8 m diameter at a depth of 24 m, yielding a group bearing capacity ( $Q_{all(g)}$ ) of 48711.72 kN with a total of 24 piles. Meanwhile, for Pile 3, the most efficient and effective design utilizes a 0.8 m diameter at a depth of 20 m, resulting in a group bearing capacity ( $Q_{all(g)}$ ) of 42618.71 kN with a total of 32 piles. The observed settlement meets the permissible limit ( $S_{g(e)} < S_{g(izin)}$ ), with values of 0.057 m for Pile 2 and 0.119 m for Pile 3. The total estimated Bill of Quantity (BOQ) required is Rp 2,771,345,263.84 for Pile 2 and Rp 3,501,815,580.71 for Pile 3.

**Keywords :** Bridge, N-SPT, Bored Pile Foundation, Bearing Capacity, Settlement.

## 1. PENDAHULUAN

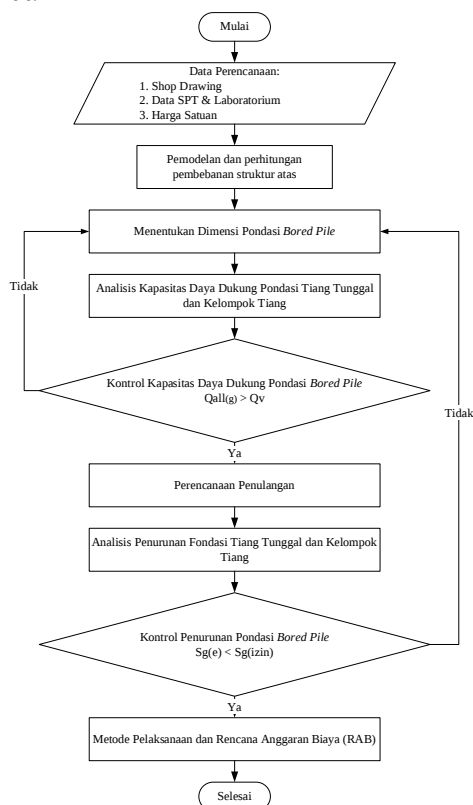
Proyek *Overpass* Simpang Susun Paiton merupakan bagian dari pembangunan Jalan Tol Probolinggo – Banyuwangi Paket 2, yang berlokasi di Kecamatan Paiton, Kabupaten Probolinggo Provinsi Jawa Timur. Berdasarkan kondisi eksisting, fondasi yang digunakan adalah jenis *bored pile* dengan diameter 0,8 meter. Data desain eksisting menunjukkan bahwa *abutment* menggunakan 14 tiang dengan kedalaman 26 meter, sementara pilar 1, pilar 2 dan pilar 3 masing-masing menggunakan kedalaman 26 meter; 28 meter; dan 24 meter, dengan jumlah 28 buah tiang per pilar. Seluruh titik bor di lokasi studi telah dilengkapi dengan data hasil uji *Standard Penetration Test* (SPT) dan uji laboratorium yang tersedia hingga kedalaman 24 meter.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis berbagai variasi kedalaman dan diameter tiang fondasi *bored pile* khususnya pada Pilar 2 dan Pilar 3 dengan variasi kedalaman yang ditinjau meliputi 18 meter; 20 meter; dan 24 meter, sedangkan variasi diameter meliputi 0,6 meter; 0,8 meter; dan 1,0 meter. Dan diambil alternatif fondasi yang paling efisien, yaitu yang mampu memenuhi kebutuhan daya dukung sesuai dengan beban rencana, dengan tetap mempertimbangkan aspek teknis dan ekonomis.

## 2. METODE

### A. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dijelaskan melalui diagram alir berikut:



### B. Pembebanan Struktur

Perhitungan struktur atas dilakukan dengan *software STAADPro CONNECT Edition V22*. Setelah pemodelan 3D, beban mati, beban hidup, dan beban angin diinput sesuai SNI 1725: 2016 tentang pembebanan untuk jembatan. Untuk beban gempa, acuan yang digunakan adalah SNI 2833: 2016 tentang perencanaan jembatan terhadap beban gempa.

### C. Kapasitas Daya Dukung Tiang Tunggal

Analisis kapasitas daya dukung fondasi tiang dilaksanakan untuk mengevaluasi kemampuan tiang dalam mendukung beban dari struktur atasnya.

#### 1) Kapasitas Daya Dukung Ujung ( $Q_p$ )

Menurut Braja M. Das (2019), perhitungan daya dukung ujung tiang ( $Q_p$ ) sebagai berikut:

a) Metode Mayerhof 1976 (Tanah Lempung)

$$Q_p = q_p \cdot A_p \quad [1]$$

$$q_p = 9 \cdot C_u \quad [2]$$

b) Metode Vesic 1977 (Tanah Lempung)

$$Q_p = N_c^* \cdot C_u \cdot A_p \quad [3]$$

Keterangan:

$Q_p$  = Kapasitas daya dukung ujung tiang (kN)

$q_p$  = Tahanan ujung tiang (kN/m<sup>2</sup>)

$C_u$  = Kohesi tak terdrainase (kN/m<sup>2</sup>)

$A_p$  = Luas penampang ujung tiang (m<sup>2</sup>)

$N_c^*$  = Faktor kapasitas daya dukung teori ekspansi rongga

#### 2) Kapasitas Daya Dukung Gesek Selimut ( $Q_s$ )

Menurut Braja M. Das (2019), perhitungan daya dukung gesek selimut tiang ( $Q_s$ ) sebagai berikut:

a) Metode  $\alpha$  (Tanah Lempung)

$$Q_s = \sum f \cdot p \cdot \Delta L = \sum \alpha \cdot C_u \cdot p \cdot \Delta L \quad [4]$$

$$f = \alpha \cdot C_u \quad [5]$$

Keterangan:

$Q_s$  = Kapasitas daya dukung gesek selimut tiang (kN)

$f$  = Resistensi gesek satuan (kN/m<sup>2</sup>)

$\alpha$  = Faktor adhesi

$C_u$  = Kohesi tak terdrainase (kN/m<sup>2</sup>)

$p$  = Keliling penampang tiang (m)

$\Delta L$  = Tebal lapisan tanah

$P_a$  = Tekanan atmosfer = 100 (kN/m<sup>2</sup>)

#### 3) Kapasitas Daya Dukung Izin ( $Q_{all}$ )

Dalam menentukan daya dukung izin yaitu dengan cara membagi kapasitas daya dukung ultimit dengan faktor keamanan

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} \quad [6]$$

Keterangan:

$Q_u$  = Kapasitas daya dukung ultimit (kN) =  $Q_p + Q_s$

$Q_{all}$  = Kapasitas daya dukung izin tiang (kN)

FS = Faktor Keamanan (*Safety Factor*)

#### D. Kapasitas Daya Dukung Kelompok Tiang

##### 1) Efisiensi Kelompok Tiang ( $\eta$ )

Menurut Braja M. Das (2019), perhitungan efisiensi kelompok tiang menggunakan metode *Converse-Labarre* sebagai berikut:

$$E_g = 1 - \frac{(n_1 - 1)n_2 + (n_2 - 1)n_1}{90 \times n_1 \times n_2} \theta \quad [7]$$

Keterangan:

$E_g$  = Efisiensi kelompok tiang (%)

$n_1$  = Jumlah tiang dalam satu baris (arah panjang)

$n_2$  = Jumlah tiang dalam satu kolom (arah lebar)

$d$  = Jarak antar tiang dalam kelompok (m)

$D$  = Diameter tiang (m)

$\theta$  = Besaran sudut ( $^\circ$ ) =  $\tan^{-1} \left( \frac{D}{d} \right)$

##### 2) Kapasitas Daya Dukung Ultimit Kelompok Tiang ( $Q_{u(g)}$ )

Kapasitas daya dukung ultimit kelompok tiang ( $Q_{u(g)}$ ) didapat dengan melibatkan faktor efisiensi tiang ( $E_g$ ) karena interaksi antar tiang dapat mengurangi total daya dukung.

$$Q_{u(g)} = n \times Q_u \times E_g \quad [8]$$

Keterangan:

$Q_{u(g)}$  = Kapasitas daya dukung ultimit kelompok tiang (kN)

$n$  = Jumlah tiang

$Q_u$  = Kapasitas daya dukung ultimit (kN)

$E_g$  = Efisiensi kelompok tiang

#### E. Distribusi Beban Tiang

Distribusi tiang bertujuan untuk menghitung beban aksial ( $P_{max}$ ) yang diterima oleh setiap tiang ke- $i$  dalam kelompok, memastikan bahwa tidak ada tiang yang kelebihan beban dari kapasitas izinnya. Beban aksial ( $P_{max}$ ) dari masing-masing tiang dihitung berdasarkan rumus berikut ini.

$$P_{max} = \frac{Q_v}{n} \pm \frac{M_y \cdot x_i}{\sum x^2} \pm \frac{M_x \cdot y_i}{\sum y^2} \quad [9]$$

Keterangan:

$P_{max}$  = Reaksi tiang atau beban aksial tiang ke- $i$  (kN)

$Q_v$  = Jumlah gaya-gaya vertikal (kN)

$n$  = Jumlah tiang dalam kelompok

$x_i, y_i$  = Jarak searah sumbu - $x$  atau sumbu - $y$  dari pusat berat kelompok tiang ke tiang nomor - 1 (m)

$\sum x^2, \sum y^2$  = Jumlah kuadrat dari jarak tiap-tiap sumbu ke pusat kelompok tiang ( $m^2$ )

$M_x, M_y$  = Jumlah momen terhadap sumbu - $x$  atau sumbu - $y$  (kN.m)

#### F. Kapasitas Daya Dukung Izin Horizontal

Kapasitas daya dukung horizontal atau beban lateral bekerja apabila terdapat pengaruh beban angin struktur atas dan beban gempa. Perhitungan daya dukung horizontal berdasarkan metode *Broms* (1964) berikut ini.

$$H_u = 9 \cdot C_u \cdot D \left( L_p \frac{3 \cdot D}{2} \right) \quad [10]$$

$$M_{max} = H_u \cdot \left( \frac{L_p}{2} + \frac{3 \cdot D}{2} \right) \quad [11]$$

Jika  $M_{max} > M_y$  maka tiang termasuk pada tiang panjang, dimana  $H_u$  dinyatakan oleh persamaan:

$$H_u = \frac{2 M_y}{\frac{3 \cdot D}{2} + \frac{L_p}{2}} \quad [12]$$

$$f = \frac{H_u}{9 \cdot C_u \cdot D} \quad [13]$$

Keterangan:

$H_u$  = Tahanan izin horizontal (kN)

$C_u$  = Kohesi tak terdrainase ( $kN/m^2$ )

$D$  = Diameter tiang (m)

$M_y$  = Momen sumbu  $y$  (kNm)

#### G. Penurunan Fondasi

##### 1) Penurunan Elastis Tiang Tunggal

Menurut Braja M. Das (2019) perhitungan penurunan tiang tunggal yang disarankan oleh *Vesic* (1977) dengan rumus sebagai berikut:

$$S_e = S_{e(1)} + S_{e(2)} + S_{e(3)} \quad [14]$$

$$S_{e(1)} = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws}) \cdot L}{A_p \cdot E_p} \quad [15]$$

$$S_{e(2)} = \left( \frac{Q_{wp} \cdot C_p}{D \cdot q_p} \right) \quad [16]$$

$$S_{e(3)} = \frac{Q_{ws} + C_s}{L q_p} \quad [17]$$

Keterangan:

$S_e$  = Penurunan total elastis fondasi tiang tunggal (m)

$S_{e(1)}$  = Penurunan elastis *bored pile* (m)

$S_{e(2)}$  = Penurunan elastis akibat beban pada ujung tiang (m)

$S_{e(3)}$  = Penurunan elastis akibat beban selimut *bored pile* (m)

$Q_{wp}$  = Kapasitas daya dukung ujung tiang (kN)

$Q_{ws}$  = Kapasitas daya dukung selimut tiang (kN)

$E_p$  = Modulus elastisitas material tiang ( $kN/m^2$ )

$\xi$  = Distribusi satuan gesekan kulit sepanjang tiang

##### 2) Penurunan Elastis Kelompok Tiang

Menurut Braja M. Das (2019), penurunan elastis kelompok tiang dipengaruhi oleh lebar kelompok tiang ( $B_g$ ) dan jarak antar tiang ( $d$ ). Hubungan paling sederhana untuk penurunan tiang kelompok diberikan oleh rumus *Vesic* (1969) sebagai berikut:

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}} S_e \quad [18]$$

Keterangan:

$S_{g(e)}$  = Penurunan elastis kelompok tiang

$B_g$  = Lebar penampang kelompok tiang

$D$  = Lebar atau diameter masing-masing tiang dalam kelompok

$s_e$  = Penurunan elastis masing-masing tiang pada beban kerja yang sebanding

### 3) Penurunan Konsolidasi

Menurut Braja M. Das (2019), penurunan konsolidasi dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\Delta\sigma'_i = \frac{Q_g}{(B_g + z_i)(L_g + z_i)} \quad [19]$$

$$\Delta S_{c(i)} = \left[ \frac{\Delta e_{(i)}}{(1 + e_{oi})} \right] H_i \quad [20]$$

$$\Delta S_{c(i)} = \left[ \frac{(C_{c(i)} H_i)}{(1 + e_{oi})} \right] \log \left[ \frac{\sigma'_{(1)} + \Delta\sigma'_{(1)}}{\sigma'_{(1)}} \right] \quad [21]$$

Keterangan:

$\Delta\sigma'_i$  = Peningkatan tegangan efektif di tengah lapisan ke-i

$Q_g$  = Beban total yang bekerja pada kelompok tiang

$B_g, L_g$  = Panjang dan lebar masing-masing dari kelompok tiang

$z_i$  = Jarak dari  $z = 0$  ke tengah lapisan tanah ke-i

$\Delta S_{c(g)}$  = Penurunan total konsolidasi pada kelompok tiang

$\Delta S_{c(i)}$  = Penurunan konsolidasi pada lapisan ke-i

### 4) Penurunan Izin

Berdasarkan SNI 8460: 2017 tentang “Persyaratan Perancangan Geoteknik” bahwa besarnya penurunan total (izin)  $< 15 \text{ cm} + \frac{b}{600}$  ( $b$  = dalam satuan cm) untuk bangunan tinggi dan bisa dibuktikan struktur atas masih aman.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Analisis Pembebanan Struktur Atas

Hasil dari analisis pembebanan struktur atas pada Pilar 2 didapatkan beban vertikal ( $Q_v$ ) dengan *software STAAD.Pro Connect Edition* sebesar 44855,152 kN yang diakibatkan oleh beban kombinasi Kuat 1. Sementara untuk Pilar 3 didapatkan beban vertikal ( $Q_v$ ) dengan *software STAAD.Pro Connect Edition* sebesar 40929,672 kN yang diakibatkan oleh beban kombinasi Kuat 1.

### B. Kapasitas Daya Dukung Tiang Tunggal

#### 1) Perhitungan Tahanan Ujung ( $Q_p$ )

##### a) Metode Mayerhof (1976)

Berikut adalah contoh perhitungan kapasitas daya dukung ujung pada Pilar 2 berdasarkan diameter  $\phi 0,60 \text{ m}$  pada kedalaman 18 m.

$$Q_p = 9 \cdot C_u \cdot A_p$$

$$C_u = 186 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_p = 9 \cdot 186 \cdot 0,503 = 473,312 \text{ kN}$$

##### b) Metode Vesic (1977)

$$Q_p = N_c^* \cdot C_u \cdot A_p$$

$$C_u = 186 \text{ kN/m}^2$$

Hitung nilai  $I_{tr}$  sebagai berikut:

$$I_{tr} = 347 \left( \frac{C_u}{P_a} \right) - 33 \leq 300$$

$$= 347 \left( \frac{186}{100} \right) - 33 \leq 300$$

$$= 612,420 \leq 300, \text{ pakai nilai terkecil yaitu } 300$$

$$N_c^* = 11,51$$

Sehingga, nilai  $Q_p$  yaitu:

$$Q_p = N_c^* \cdot C_u \cdot A_p$$

$$= 11,51 \cdot 186 \cdot 0,283 = 605,314 \text{ kN}$$

#### 2) Perhitungan Tahanan Gesek Selimut ( $Q_s$ )

Berikut adalah contoh perhitungan kapasitas daya dukung gesek selimut pada Pilar 2 berdasarkan diameter  $\phi 0,60 \text{ m}$  pada kedalaman 18 m.

- Lapisan tanah 1

$$Q_{s-1} = \alpha \cdot C_u \cdot p \cdot \Delta L_1$$

$$= 0,812 \cdot 31 \cdot 1,885 \cdot 2 = 94,896 \text{ kN}$$

- Lapisan tanah 2

$$Q_{s-2} = \alpha \cdot C_u \cdot p \cdot \Delta L_2$$

$$= 0,692 \cdot 48 \cdot 1,885 \cdot 2 = 125,221 \text{ kN}$$

- Lapisan tanah 3

$$Q_{s-3} = \alpha \cdot C_u \cdot p \cdot \Delta L_3$$

$$= 0,420 \cdot 120 \cdot 1,885 \cdot 2 = 190,004 \text{ kN}$$

- Lapisan tanah 4

$$Q_{s-4} = \alpha \cdot C_u \cdot p \cdot \Delta L_4$$

$$= 0,396 \cdot 144 \cdot 1,885 \cdot 2 = 214,975 \text{ kN}$$

- Lapisan tanah 5

$$Q_{s-5} = \alpha \cdot C_u \cdot p \cdot \Delta L_5$$

$$= 0,357 \cdot 186 \cdot 1,885 \cdot 2 = 250,330 \text{ kN}$$

- Lapisan tanah 6

$$Q_{s-6} = \alpha \cdot C_u \cdot p \cdot \Delta L_6$$

$$= 0,620 \cdot 60 \cdot 1,885 \cdot 2 = 140,241 \text{ kN}$$

- Lapisan tanah 7

$$Q_{s-7} = \alpha \cdot C_u \cdot p \cdot \Delta L_7$$

$$= 0,850 \cdot 27 \cdot 1,885 \cdot 2 = 86,519 \text{ kN}$$

- Lapisan tanah 8

$$Q_{s-8} = \alpha \cdot C_u \cdot p \cdot \Delta L_8$$

$$= 0,620 \cdot 60 \cdot 1,885 \cdot 2 = 140,241 \text{ kN}$$

- Lapisan tanah 9

$$Q_{s-9} = \alpha \cdot C_u \cdot p \cdot \Delta L_9$$

$$= 0,357 \cdot 186 \cdot 1,885 \cdot 2 = 250,330 \text{ kN}$$

Sehingga jumlah nilai  $Q_s$  yaitu:

$$Q_{s\text{-total}} = Q_{s-1} + Q_{s-2} + Q_{s-3} + Q_{s-4} + Q_{s-5} + Q_{s-6} + Q_{s-7} + Q_{s-8} + Q_{s-9}$$

$$= 94,896 + 125,221 + 190,004 + 214,975 + 250,330 + 140,241 + 86,519 + 140,241 + 250,330 = 1492,757 \text{ kN}$$

### 3) Perhitungan Kapasitas Daya Dukung Ultimit ( $Q_u$ )

a) Metode Mayerhof (1976)

$$Q_u = Q_p + Q_s \\ = 473,312 + 1492,757 = 1966,069 \text{ kN}$$

b) Metode Vesic (1977)

$$Q_u = Q_p + Q_s \\ = 605,314 + 1492,757 = 2098,071 \text{ kN}$$

### 4) Perhitungan Kapasitas Daya Dukung Izin ( $Q_{all}$ )

a) Metode Mayerhof (1976)

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{1966,069}{3} = 655,365 \text{ kN}$$

b) Metode Vesic (1977)

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{2098,071}{3} = 699,357 \text{ kN}$$

Berikut adalah rekapitulasi hasil perhitungan kapasitas daya dukung tiang tunggal metode Mayerhof (1976) dan Vesic (1977) pada Pilar 2 dan Pilar 3.

**Tabel 1** Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Tiang Tunggal Metode Mayerhof 1976 pada Pilar 2

| Mayerhof (1976) Pilar 2 |        |          |          |          |            |
|-------------------------|--------|----------|----------|----------|------------|
| L<br>m                  | D<br>m | Qp<br>kN | Qs<br>kN | Qu<br>kN | Qall<br>kN |
| 18                      | 0,6    | 473,312  | 1492,757 | 1966,069 | 655,356    |
|                         | 0,8    | 841,444  | 1990,342 | 2831,786 | 943,929    |
|                         | 1      | 1314,757 | 2487,928 | 3802,684 | 1267,561   |
| 20                      | 0,6    | 1022,965 | 2008,028 | 3030,994 | 1010,331   |
|                         | 0,8    | 1818,605 | 2677,371 | 4495,976 | 1498,659   |
|                         | 1      | 2841,571 | 3346,714 | 6188,284 | 2062,761   |
| 24                      | 0,6    | 1022,965 | 3038,571 | 4061,536 | 1353,845   |
|                         | 0,8    | 1818,605 | 4051,428 | 5870,033 | 1956,678   |
|                         | 1      | 2841,571 | 5064,285 | 7905,856 | 2635,285   |

**Tabel 2** Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Tiang Tunggal Metode Mayerhof 1976 pada Pilar 3

| Mayerhof (1976) Pilar 3 |        |          |          |          |            |
|-------------------------|--------|----------|----------|----------|------------|
| L<br>m                  | D<br>m | Qp<br>kN | Qs<br>kN | Qu<br>kN | Qall<br>kN |
| 18                      | 0,6    | 61,073   | 944,717  | 1005,790 | 335,263    |
|                         | 0,8    | 108,573  | 1259,623 | 1368,196 | 456,065    |
|                         | 1      | 169,646  | 1574,529 | 1744,175 | 581,392    |
| 20                      | 0,6    | 1022,965 | 1459,989 | 2482,954 | 827,651    |
|                         | 0,8    | 1818,605 | 1946,651 | 3765,257 | 1255,086   |
|                         | 1      | 2841,571 | 2433,314 | 5274,885 | 1758,295   |
| 24                      | 0,6    | 1022,965 | 2490,532 | 3513,497 | 1171,166   |
|                         | 0,8    | 1818,605 | 3320,709 | 5139,314 | 1713,105   |
|                         | 1      | 2841,571 | 4150,886 | 6992,456 | 2330,819   |

**Tabel 3** Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Tiang Tunggal Metode Vesic 1977 pada Pilar 2

| Vesic (1977) Pilar 2 |        |          |          |          |            |
|----------------------|--------|----------|----------|----------|------------|
| L<br>m               | D<br>m | Qp<br>kN | Qs<br>kN | Qu<br>kN | Qall<br>kN |
| 18                   | 0,6    | 605,314  | 1492,757 | 2098,071 | 699,357    |

| Vesic (1977) Pilar 2 |        |          |          |          |            |
|----------------------|--------|----------|----------|----------|------------|
| L<br>m               | D<br>m | Qp<br>kN | Qs<br>kN | Qu<br>kN | Qall<br>kN |
| 20                   | 0,8    | 1076,114 | 1990,342 | 3066,456 | 1022,152   |
|                      | 1      | 1681,428 | 2487,928 | 4169,355 | 1389,785   |
|                      | 0,6    | 1308,259 | 2008,028 | 3316,287 | 1105,429   |
| 24                   | 0,8    | 2325,794 | 2677,371 | 5003,165 | 1667,722   |
|                      | 1      | 3634,053 | 3346,714 | 6980,767 | 2326,922   |
|                      | 0,6    | 1308,259 | 3038,571 | 4346,830 | 1448,943   |
| 24                   | 0,8    | 2325,794 | 4051,428 | 6377,222 | 2125,741   |
|                      | 1      | 3634,053 | 5064,285 | 8698,338 | 2899,446   |

**Tabel 4** Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Tiang Tunggal Metode Vesic 1977 pada Pilar 3

| Vesic (1977) Pilar 3 |        |          |          |          |            |
|----------------------|--------|----------|----------|----------|------------|
| L<br>m               | D<br>m | Qp<br>kN | Qs<br>kN | Qu<br>kN | Qall<br>kN |
| 18                   | 0,6    | 61,735   | 944,717  | 1006,452 | 335,484    |
|                      | 0,8    | 109,750  | 1259,623 | 1369,373 | 456,458    |
|                      | 1      | 171,485  | 1574,529 | 1746,014 | 582,005    |
| 20                   | 0,6    | 1308,259 | 1459,989 | 2768,248 | 922,749    |
|                      | 0,8    | 2325,794 | 1946,651 | 4272,445 | 1424,148   |
|                      | 1      | 3634,053 | 2433,314 | 6067,367 | 2022,456   |
| 24                   | 0,6    | 1308,259 | 2490,532 | 3798,791 | 1266,264   |
|                      | 0,8    | 2325,794 | 3320,709 | 5646,503 | 1882,168   |
|                      | 1      | 3634,053 | 4150,886 | 7784,939 | 2594,980   |

**Tabel 5** Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Tiang Tunggal Rata-rata pada Pilar 2

| L<br>m | D<br>m | Qp<br>kN | Qs<br>kN | Qu<br>kN | Qall<br>kN |
|--------|--------|----------|----------|----------|------------|
| 18     | 0,6    | 539,313  | 1492,757 | 2032,070 | 677,357    |
|        | 0,8    | 958,779  | 1990,342 | 2949,121 | 983,040    |
|        | 1      | 1498,092 | 2487,928 | 3986,020 | 1328,673   |
| 20     | 0,6    | 1165,612 | 2008,028 | 3173,640 | 1057,880   |
|        | 0,8    | 2072,200 | 2677,371 | 4749,570 | 1583,190   |
|        | 1      | 3237,812 | 3346,714 | 6584,525 | 2194,842   |
| 24     | 0,6    | 1165,612 | 3038,571 | 4204,183 | 1401,394   |
|        | 0,8    | 2072,200 | 4051,428 | 6123,628 | 2041,209   |
|        | 1      | 3237,812 | 5064,285 | 8302,097 | 2767,366   |

**Tabel 6** Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Tiang Tunggal Rata-rata pada Pilar 3

| L<br>m | D<br>m | Qp<br>kN | Qs<br>kN | Qu<br>kN | Qall<br>kN |
|--------|--------|----------|----------|----------|------------|
| 18     | 0,6    | 61,404   | 944,717  | 1006,121 | 335,374    |
|        | 0,8    | 109,162  | 1259,623 | 1368,785 | 456,262    |
|        | 1      | 170,565  | 1574,529 | 1745,094 | 581,698    |
| 20     | 0,6    | 1165,612 | 1459,989 | 2625,601 | 875,200    |
|        | 0,8    | 2072,200 | 1946,651 | 4018,851 | 1339,617   |
|        | 1      | 3237,812 | 2433,314 | 5671,126 | 1890,375   |
| 24     | 0,6    | 1165,612 | 2490,532 | 3656,144 | 1218,715   |
|        | 0,8    | 2072,200 | 3320,709 | 5392,908 | 1797,636   |
|        | 1      | 3237,812 | 4150,886 | 7388,698 | 2462,899   |

### C. Kapasitas Daya Dukung Kelompok Tiang

1) Efisiensi Kelompok Tiang ( $E_g$ )

Berikut adalah contoh perhitungan kapasitas daya dukung fondasi kelompok tiang pada Pilar 2 berdasarkan diameter  $\phi 1,0$  m pada kedalaman 18 m.

$$\begin{aligned} E_g &= 1 - \left[ \frac{(n_1-1) \cdot n_2 + (n_2-1) \cdot n_1}{90 \cdot n_1 \cdot n_2} \right] \theta \\ &= 1 - \left[ \frac{(n_1-1) \cdot n_2 + (n_2-1) \cdot n_1}{90 \cdot n_1 \cdot n_2} \right] \tan^{-1} \frac{D}{d} \\ &= 1 - \left[ \frac{(9-1) \cdot 4 + (4-1) \cdot 9}{90 \cdot 9 \cdot 4} \right] \tan^{-1} \frac{1,0}{3} \\ &= 0,9941 \\ &= 99,414 \% \end{aligned}$$

2) Kapasitas Daya Dukung Ultimit Kelompok Tiang ( $Q_{u(g)}$ )

$$\begin{aligned} Q_{u(g)} &= E_g \cdot n \cdot Q_u \\ &= 0,9941 \cdot 36 \cdot 3986,020 \\ &= 142655,959 \text{ kN} \end{aligned}$$

3) Kapasitas Daya Dukung Izin Kelompok Tiang ( $Q_{all(g)}$ )

$$\begin{aligned} Q_{all(g)} &= \frac{Q_{u(g)}}{FS} \\ &= \frac{142655,959}{3} \\ &= 47551,986 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cek} &= Q_{all(g)} > Q_v \\ &= 47551,986 \text{ kN} > 44855,2 \text{ (OK)} \end{aligned}$$

Berikut adalah rekapitulasi hasil perhitungan kapasitas daya dukung kelompok tiang pada Pilar 2 dan Pilar 3.

**Tabel 7** Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Kelompok Tiang pada Pilar 2

| L  | D   | Jumlah tiang |       |       | $L_g$ | $B_g$ | d   |
|----|-----|--------------|-------|-------|-------|-------|-----|
|    |     | n            | $n_1$ | $n_2$ |       |       |     |
| m  | m   | buah         | buah  | buah  | m     | m     | m   |
| 18 | 0,6 | 68           | 17    | 4     | 30    | 6     | 1,8 |
|    | 0,8 | 48           | 12    | 4     | 28    | 8     | 2,4 |
|    | 1   | 36           | 9     | 4     | 25    | 10    | 3   |
| 20 | 0,6 | 44           | 11    | 4     | 19    | 6     | 1,8 |
|    | 0,8 | 32           | 8     | 4     | 18    | 8     | 2,4 |
|    | 1   | 24           | 6     | 4     | 16    | 10    | 3   |
| 24 | 0,6 | 36           | 9     | 4     | 15    | 6     | 1,8 |
|    | 0,8 | 24           | 6     | 4     | 13    | 8     | 2,4 |
|    | 1   | 20           | 5     | 4     | 13    | 10    | 3   |

**Tabel 8** Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Kelompok Tiang pada Pilar 2 (Lanjutan)

| L  | D   | $E_g$ |       | $Q_{u(g)}$ | $Q_{all(g)}$ | Cek  |
|----|-----|-------|-------|------------|--------------|------|
| m  | m   | ,     | %     | kN         | kN           |      |
| 18 | 0,6 | 0,99  | 99,40 | 137345     | 45782        | AMAN |
|    | 0,8 | 0,99  | 99,40 | 140714     | 46905        | AMAN |
|    | 1   | 0,99  | 99,41 | 142656     | 47552        | AMAN |
| 20 | 0,6 | 0,99  | 99,41 | 138812     | 46271        | AMAN |
|    | 0,8 | 0,99  | 99,42 | 151103     | 50368        | AMAN |
|    | 1   | 0,99  | 99,43 | 157134     | 52378        | AMAN |
| 24 | 0,6 | 0,99  | 99,41 | 150464     | 50155        | AMAN |
|    | 0,8 | 0,99  | 99,43 | 146135     | 48712        | AMAN |
|    | 1   | 0,99  | 99,45 | 165122     | 55041        | AMAN |

**Tabel 9** Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Kelompok Tiang pada Pilar 3

| L  | D   | Jumlah tiang |       |       | $L_g$ | $B_g$ | d   |
|----|-----|--------------|-------|-------|-------|-------|-----|
|    |     | n            | $n_1$ | $n_2$ |       |       |     |
| m  | m   | buah         | buah  | buah  | m     | m     | m   |
| 18 | 0,6 | 124          | 31    | 4     | 55    | 6     | 1,8 |
|    | 0,8 | 92           | 23    | 4     | 54    | 8     | 2,4 |
|    | 1   | 72           | 18    | 4     | 52    | 10    | 3   |
| 20 | 0,6 | 48           | 12    | 4     | 21    | 6     | 1,8 |
|    | 0,8 | 32           | 8     | 4     | 18    | 8     | 2,4 |
|    | 1   | 24           | 6     | 4     | 16    | 10    | 3   |
| 24 | 0,6 | 36           | 9     | 4     | 15    | 6     | 1,8 |
|    | 0,8 | 24           | 6     | 4     | 13    | 8     | 2,4 |
|    | 1   | 20           | 5     | 4     | 13    | 10    | 3   |

**Tabel 10** Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Kelompok Tiang pada Pilar 3 (Lanjutan)

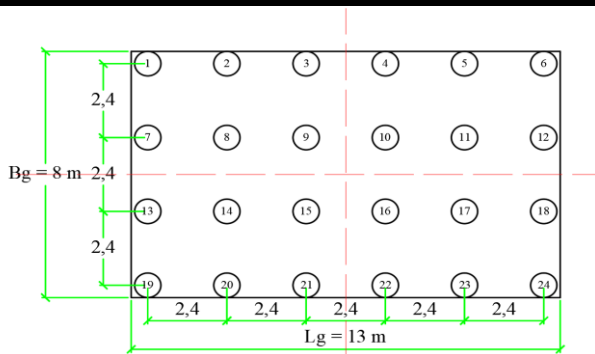
| L  | D   | $E_g$ |       | $Q_{u(g)}$ | $Q_{all(g)}$ | Cek  |
|----|-----|-------|-------|------------|--------------|------|
| m  | m   | ,     | %     | kN         | kN           |      |
| 18 | 0,6 | 0,99  | 99,39 | 123993     | 41331        | AMAN |
|    | 0,8 | 0,99  | 99,39 | 125160     | 41720        | AMAN |
|    | 1   | 0,99  | 99,39 | 124886     | 41629        | AMAN |
| 20 | 0,6 | 0,99  | 99,40 | 125278     | 41759        | AMAN |
|    | 0,8 | 0,99  | 99,42 | 127856     | 42619        | AMAN |
|    | 1   | 0,99  | 99,43 | 135337     | 45112        | AMAN |
| 24 | 0,6 | 0,99  | 99,41 | 130850     | 43617        | AMAN |
|    | 0,8 | 0,99  | 99,43 | 128697     | 42899        | AMAN |
|    | 1   | 0,99  | 99,45 | 146955     | 48985        | AMAN |

**D. Penentuan Desain Fondasi Bored Pile**

Pada Pilar 2 dipilih desain fondasi *bored pile* diameter 0,8 m dengan kedalaman 24 m dan berjumlah 24 tiang, menggunakan *pile cap* berdimensi 13 m x 8 m. Sementara pada Pilar 3, dipilih desain fondasi *bored pile* diameter 0,8 m dengan kedalaman 20 m dan berjumlah 32 tiang, menggunakan *pile cap* berdimensi 18 m x 8 m. Pemilihan desain tersebut karena lebih efisien dan efektivitas dalam volume material yang paling minimum di antara variasi diameter dan kedalaman lainnya yang memenuhi syarat teknis.

**E. Distribusi Beban Tiang**

Berikut adalah contoh perhitungan distribusi tiang pada Pilar 2 berdasarkan diameter  $\phi 0,80$  m pada kedalaman 24 m.



Gambar 1 Distribusi Tiang pada Pilar 2

Tabel 11 Distribusi Tiang Pilar 2

| No        | x<br>m | y<br>m | Qv/n<br>kN | x <sup>2</sup><br>m <sup>2</sup> | y <sup>2</sup><br>m <sup>2</sup> | P <sub>max</sub><br>kN |
|-----------|--------|--------|------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| 1         | -6     | 3,6    | 1868,96    | 36                               | 12,96                            | 1868,05                |
| 2         | -3,6   | 3,6    | 1868,96    | 12,96                            | 12,96                            | 1940,63                |
| 3         | -1,2   | 3,6    | 1868,96    | 1,44                             | 12,96                            | 2013,21                |
| 4         | 1,2    | 3,6    | 1868,96    | 1,44                             | 12,96                            | 2085,79                |
| 5         | 3,6    | 3,6    | 1868,96    | 12,96                            | 12,96                            | 2158,37                |
| 6         | 6      | 3,6    | 1868,96    | 36                               | 12,96                            | 2230,95                |
| 7         | -6     | 1,2    | 1868,96    | 36                               | 1,44                             | 1747,69                |
| 8         | -3,6   | 1,2    | 1868,96    | 12,96                            | 1,44                             | 1820,27                |
| 9         | -1,2   | 1,2    | 1868,96    | 1,44                             | 1,44                             | 1892,85                |
| 10        | 1,2    | 1,2    | 1868,96    | 1,44                             | 1,44                             | 1965,43                |
| 11        | 3,6    | 1,2    | 1868,96    | 12,96                            | 1,44                             | 2038,01                |
| 12        | 6      | 1,2    | 1868,96    | 36                               | 1,44                             | 2110,6                 |
| 13        | -6     | -1,2   | 1868,96    | 36                               | 1,44                             | 1627,33                |
| 14        | -3,6   | -1,2   | 1868,96    | 12,96                            | 1,44                             | 1699,91                |
| 15        | -1,2   | -1,2   | 1868,96    | 1,44                             | 1,44                             | 1772,5                 |
| 16        | 1,2    | -1,2   | 1868,96    | 1,44                             | 1,44                             | 1845,08                |
| 17        | 3,6    | -1,2   | 1868,96    | 12,96                            | 1,44                             | 1917,66                |
| 18        | 6      | -1,2   | 1868,96    | 36                               | 1,44                             | 1990,24                |
| 19        | -6     | -3,6   | 1868,96    | 36                               | 12,96                            | 1506,98                |
| 20        | -3,6   | -3,6   | 1868,96    | 12,96                            | 12,96                            | 1579,56                |
| 21        | -1,2   | -3,6   | 1868,96    | 1,44                             | 12,96                            | 1652,14                |
| 22        | 1,2    | -3,6   | 1868,96    | 1,44                             | 12,96                            | 1724,72                |
| 23        | 3,6    | -3,6   | 1868,96    | 12,96                            | 12,96                            | 1797,3                 |
| 24        | 6      | -3,6   | 1868,96    | 36                               | 12,96                            | 1869,88                |
| Total (Σ) |        |        | 403,2      | 172,8                            | 44855,2                          |                        |

Contoh perhitungan distribusi Tiang ke 1

$$P_{-T1} = \frac{44855,2}{24} + \frac{12193,57 \cdot (-6)}{403,2} + \frac{8665,80 \cdot 3,6}{172,8} = 1868,05 \text{ kN}$$

Perhitungan sama untuk no. tiang lainnya, kemudian di cari nilai  $P_{\max}$  paling maksimum yaitu berada pada tiang no. 6 sebesar 2230,95 kN. Dan di cek dengan rumus  $\phi P_n$  (tulangan kolom) sebagai berikut:

Diketahui:

Diameter (D) = 0,8 m = 800 mm

Kuat tekan ( $f_c'$ ) = 30 MPa

Kuat lentur ( $f_y$ ) = 420 MPa

Diameter tulangan lentur ( $\rho$ ) = 19 mm

Luas penampang tiang ( $A_g$ ) =  $\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 800^2$   
=  $\frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 800^2$

$$= 502654,82 \text{ mm}^2$$

Luas penampang tiang ( $A_{st}$ ) =  $A_g \cdot \rho = 3969,40 \text{ mm}^2$

Beban aksial ultimate ( $P_u$ )

$$P_u = \phi 0,85 [0,85 \cdot f_c' \cdot (A_g - A_{st}) + (f_y \cdot A_{st})]$$

$$P_u = 0,8 \cdot 0,85 [0,85 \cdot 30 \cdot (502654,82 - 3969,40) + (420 \cdot 3969,40)]$$

$$P_u = 9169562,37 \text{ kN}$$

Kontrol  $P_{\max} \leq P_u = 2230,95 \leq 9169562,37 \text{ kN}$  (OK)

#### F. Kapasitas Daya Dukung Izin Horizontal ( $H_u$ )

Berikut adalah contoh perhitungan kapasitas dukung izin horizontal ( $H_u$ ) pada Pilar 2 berdasarkan diameter  $\phi 0,80$  m pada kedalaman 24 m.

$$L = 24 \text{ m}$$

$$D = 0,8 \text{ m}$$

$$C_u = 402$$

$$H_u = 9 \cdot C_u \cdot D \left( \frac{L}{2} \right)^{\frac{3D}{2}}$$

$$= 9 \cdot 402 \cdot 0,8 \left( 24^{\frac{3 \cdot 0,8}{2}} \right) = 83358,72 \text{ kNm}$$

Dengan nilai  $M_{\max}$ , sebagai berikut:

$$M_{\max} = H_u \cdot \left( \frac{L}{2} + \frac{3D}{2} \right)$$

$$= 83358,72 \cdot \left( \frac{24}{2} + \frac{3 \cdot 0,8}{2} \right) = 1100335 \text{ kNm}$$

Jadi,  $M_{\max} > M_y$

$$1100335 > 12193,57 \text{ kNm}$$

Jika  $M_{\max} > M_y$ , maka tiang tersebut termasuk kategori tiang panjang.

$$f = \frac{H_u}{9 \cdot C_u \cdot D} = \frac{H_u}{9 \cdot 402 \cdot 0,8} = \frac{1}{9 \cdot 402 \cdot 0,8} \cdot H_u = 0,00035 \cdot H_u$$

Dengan nilai  $H_u$  sebagai berikut:

$$H_u = \frac{2 M_y}{\frac{3 \cdot D}{2}}$$

$$= \frac{2 \cdot 12193,57}{\frac{3 \cdot 0,8}{2}} = \frac{24387,138}{1,2 + 0,00017 \cdot H_u^2}$$

$$= 1,2 \cdot H_u + 0,00017 \cdot H_u^2 = 24387,1$$

$$= 8905,570 \text{ kN}$$

Dengan jumlah tiang sebesar 24 buah, sehingga

$$H_u = 8905,570 \cdot 24 = 213733,69 \text{ kN}$$

Cek dengan beban horizontal pada Pilar 2

Jadi,  $H_u > Q_h$

$$213733,69 > 5368,4 \text{ kN (OK)}$$

#### G. Penurunan Elastis Tiang

##### 1) Penurunan Elastis Tiang Tunggal

Berikut adalah contoh perhitungan penurunan elastis tiang tunggal pada Pilar 2 berdasarkan diameter  $\phi 0,80$  m pada kedalaman 24 m.

a) Penurunan Elastis Bored Pile ( $S_{e(1)}$ )

$$S_{e(1)} = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws}) \cdot L}{A_p \cdot E_p}$$

$$= \frac{(2072,200 + 0,5 \cdot 4051,428) \cdot 24}{0,503 \cdot 25742960} = 0,0076 \text{ m}$$

b) Penurunan elastis akibat beban pada ujung tiang (m)

$$S_{e(2)} = \left( \frac{Q_{wp} \cdot C_p}{D \cdot q_p} \right) = \frac{2072,200 \cdot 0,03}{0,8 \cdot 4123} = 0,019 \text{ m}$$

c) Penurunan tiang akibat beban kerja ( $Q_{wp}$ ) pada titik tiang berdasarkan

$$S_{e(3)} = \frac{Q_{ws} + C_s}{L_{q_p}} = \frac{4051,428 + 0,054}{24 \cdot 4123} = 0,0022 \text{ m}$$

Sehingga total penurunan elastis adalah:

$$S_e = S_{e(1)} + S_{e(2)} + S_{e(3)} = 0,0076 + 0,019 + 0,0022 = 0,029 \text{ m} = 2,87 \text{ cm}$$

Berikut adalah rekapitulasi hasil perhitungan penurunan elastis tiang pada Pilar 2 dan Pilar 3.

**Tabel 12** Rekapitulasi Perhitungan Penurunan Elastis Tiang Tunggal Pilar 2

| Penurunan Tiang Tunggal |          |                   |                   |                   |              |               |
|-------------------------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|---------------|
| L<br>(m)                | D<br>(m) | $S_{e(1)}$<br>(m) | $S_{e(2)}$<br>(m) | $S_{e(3)}$<br>(m) | $S_e$<br>(m) | $S_e$<br>(cm) |
| 18                      | 0,6      | 0,0032            | 0,014             | 0,0024            | 0,020        | 1,97          |
|                         | 0,8      | 0,0027            | 0,019             | 0,0029            | 0,025        | 2,45          |
|                         | 1        | 0,0024            | 0,024             | 0,0035            | 0,030        | 2,95          |
| 20                      | 0,6      | 0,0060            | 0,014             | 0,0014            | 0,021        | 2,15          |
|                         | 0,8      | 0,0053            | 0,019             | 0,0017            | 0,026        | 2,58          |
|                         | 1        | 0,0049            | 0,024             | 0,0020            | 0,030        | 3,04          |
| 24                      | 0,6      | 0,0089            | 0,014             | 0,0018            | 0,025        | 2,48          |
|                         | 0,8      | 0,0076            | 0,019             | 0,0022            | 0,029        | 2,87          |
|                         | 1        | 0,0068            | 0,024             | 0,0026            | 0,033        | 3,30          |

**Tabel 13** Rekapitulasi Perhitungan Penurunan Elastis Tiang Tunggal Pilar 3

| Penurunan Tiang Tunggal |          |                   |                   |                   |              |               |
|-------------------------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|---------------|
| L<br>(m)                | D<br>(m) | $S_{e(1)}$<br>(m) | $S_{e(2)}$<br>(m) | $S_{e(3)}$<br>(m) | $S_e$<br>(m) | $S_e$<br>(cm) |
| 18                      | 0,6      | 0,014             | 0,0131            | 0,029             | 2,86         | 0,014         |
|                         | 0,8      | 0,019             | 0,0163            | 0,036             | 3,62         | 0,019         |
|                         | 1        | 0,024             | 0,0194            | 0,044             | 4,39         | 0,024         |
| 20                      | 0,6      | 0,014             | 0,0010            | 0,020             | 2,03         | 0,014         |
|                         | 0,8      | 0,019             | 0,0012            | 0,025             | 2,48         | 0,019         |
|                         | 1        | 0,024             | 0,0015            | 0,029             | 2,94         | 0,024         |
| 24                      | 0,6      | 0,014             | 0,0015            | 0,024             | 2,36         | 0,014         |
|                         | 0,8      | 0,019             | 0,0018            | 0,028             | 2,76         | 0,019         |
|                         | 1        | 0,024             | 0,0022            | 0,032             | 3,20         | 0,024         |

## 2) Penurunan Kelompok Tiang

Berikut adalah contoh perhitungan penurunan elastis tiang tunggal pada Pilar 2 berdasarkan diameter  $\phi 0,80$  m pada kedalaman 24 m.

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}} S_e$$

$$= \sqrt{\frac{8}{0,8}} 0,029 = 0,091 \text{ m} = 9,07 \text{ cm}$$

Berikut adalah rekapitulasi hasil perhitungan penurunan elastis kelompok tiang pada Pilar 2 dan Pilar 3.

**Tabel 14** Rekapitulasi Perhitungan Penurunan Elastis Kelompok Tiang Pilar 2

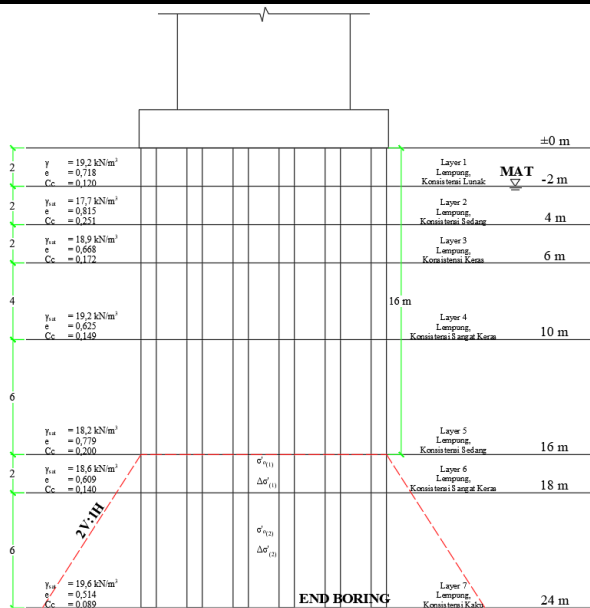
| Penurunan Kelompok Tiang |        |                 |                  |
|--------------------------|--------|-----------------|------------------|
| L<br>m                   | D<br>m | $S_{g(e)}$<br>m | $S_{g(e)}$<br>cm |
| 18                       | 0,6    | 0,062           | 6,22             |
|                          | 0,8    | 0,077           | 7,75             |
|                          | 1      | 0,093           | 9,33             |
| 20                       | 0,6    | 0,068           | 6,78             |
|                          | 0,8    | 0,082           | 8,16             |
|                          | 1      | 0,096           | 9,62             |
| 24                       | 0,6    | 0,078           | 7,84             |
|                          | 0,8    | 0,091           | 9,07             |
|                          | 1      | 0,104           | 10,45            |

**Tabel 15** Rekapitulasi Perhitungan Penurunan Elastis Kelompok Tiang Pilar 3

| Penurunan Kelompok Tiang |        |                 |                  |
|--------------------------|--------|-----------------|------------------|
| L<br>m                   | D<br>m | $S_{g(e)}$<br>m | $S_{g(e)}$<br>cm |
| 18                       | 0,6    | 0,090           | 9,03             |
|                          | 0,8    | 0,114           | 11,45            |
|                          | 1      | 0,139           | 13,87            |
| 20                       | 0,6    | 0,064           | 6,43             |
|                          | 0,8    | 0,078           | 7,84             |
|                          | 1      | 0,093           | 9,31             |
| 24                       | 0,6    | 0,074           | 7,45             |
|                          | 0,8    | 0,087           | 8,73             |
|                          | 1      | 0,101           | 10,13            |

## 3) Penurunan Konsolidasi

Berikut adalah contoh perhitungan penurunan elastis tiang tunggal pada Pilar 2 berdasarkan diameter  $\phi 0,80$  m pada kedalaman 24 m. Terdapat 7 (tujuh) lapisan tanah berdasarkan konsistensi hasil uji SPT untuk identifikasi jenis tanah, serta 2 (dua) lapisan digunakan untuk analisis konsolidasi sebagai perhitungan tegangan efektif ( $\Delta\sigma'_0$ ).



- a) Menentukan nilai  $z_i$
- $$z_1 = 2 \text{ meter}/2 = 1 \text{ m}$$
- $$z_2 = 4 + (6 \text{ meter}/2) = 7 \text{ m}$$
- b) Menghitung peningkatan tegangan efektif di tengah setiap lapisan tanah akibat beban total yang bekerja pada kelompok tiang ( $Q_g$ )
- $$\Delta \sigma'_1 = \frac{Q_g}{(B_g + z_1)(L_g + z_1)}$$
- $$= \frac{40929,67}{(8 + 2)(13 + 2)} = 204,648 \text{ kN/m}^2$$
- $$\Delta \sigma'_2 = \frac{Q_g}{(B_g + z_2)(L_g + z_2)}$$
- $$= \frac{40929,67}{(8 + 7)(13 + 7)} = 109,146 \text{ kN/m}^2$$
- c) Menghitung tegangan overburden efektif awal
- $$\sigma'_{o1} = \gamma_1 \cdot h_1 + \gamma'_2 \cdot h_2 + \gamma'_3 \cdot h_3 + \gamma'_4 \cdot h_4 + \gamma'_5 \cdot h_5 + \gamma'_6 \cdot \frac{h_6}{2}$$
- $$= (17,4 \cdot 2) + ((16,9 - 9,81)2) + ((17,5 - 9,81)2) + ((18,1 - 9,81)4) + ((19 - 9,81)2) + ((17,5 - 9,81) \frac{6}{2})$$
- $$= 138,86 \text{ kN/m}^2$$
- $$\sigma'_{o2} = \gamma_1 \cdot h_1 + \gamma'_2 \cdot h_2 + \gamma'_3 \cdot h_3 + \gamma'_4 \cdot h_4 + \gamma'_5 \cdot h_5 + \gamma'_6 \cdot h_6 + \gamma'_7 \cdot \frac{h_7}{2}$$
- $$= (17,4 \cdot 2) + ((16,9 - 9,81)2) + ((17,5 - 9,81)2) + ((18,1 - 9,81)4) + ((19 - 9,81)2) + ((17,5 - 9,81)6) + ((19,6 - 9,81) \frac{6}{2})$$
- $$= 191,191 \text{ kN/m}^2$$
- d) Menentukan nilai OC (Over Consolidated) atau NC (Normally Consolidated)
- $$\sigma'_{c1} = 67 \cdot N^{0,83} \cdot \text{Pa}$$
- $$= 67 \cdot 23^{0,83} \cdot 100 = 90429,25$$
- $$\sigma'_{c2} = 67 \cdot N^{0,83} \cdot \text{Pa}$$

$$= 67 \cdot 50^{0,83} \cdot 100 = 172274,07$$

$$\text{OCR}_1 = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{o1}}$$

$$= \frac{90429,25}{138,86} = 651,224$$

$$\text{OCR}_2 = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{o2}}$$

$$= \frac{172274,07}{191,191} = 901,057$$

Nilai OCR > 1, sehingga tanah mengalami *overconsolidated*

Klasifikasikan kompresibilitas berdasarkan RR (*Recompression Ratio*), menggunakan rasio antara (0,10 – 0,20) berdasarkan buku korelasi (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 19 C.E.)

$$Cr_{L1} = Cc_{L1} \cdot 0,15 = 0,25 \cdot 0,15 = 0,037$$

$$Cr_{L2} = Cc_{L2} \cdot 0,15 = 0,09 \cdot 0,15 = 0,013$$

Cek nilai  $\sigma'_o < \sigma'_c$  dan  $\sigma'_o + \Delta \sigma'_o \leq \sigma'_c$  *overconsolidated*, maka menggunakan rumus

$$\Delta S_{c(i)} = \left[ \frac{(Cr(i) H_i)}{(1 + e_{oi})} \right] \log \left[ \frac{\sigma'_{o(i)} + \Delta \sigma'_{(i)}}{\sigma'_{(i)}} \right]$$

- e) Total penurunan konsolidasi kelompok tiang:

$$\Delta S_{c(1)} = \left[ \frac{(Cr(1) H_1)}{(1 + e_{o1})} \right] \log \left[ \frac{\sigma'_{o(1)} + \Delta \sigma'_{(1)}}{\sigma'_{(1)}} \right]$$

$$= \left[ \frac{(0,037 \cdot 4)}{(1 + 0,911)} \right] \log \left[ \frac{138,86 + 204,648}{138,86} \right]$$

$$= 0,030 \text{ m} = 3 \text{ cm}$$

$$\Delta S_{c(2)} = \left[ \frac{(Cr(2) H_2)}{(1 + e_{o1})} \right] \log \left[ \frac{\sigma'_{o(2)} + \Delta \sigma'_{(2)}}{\sigma'_{(2)}} \right]$$

$$= \left[ \frac{(0,013 \cdot 6)}{(1 + 0,514)} \right] \log \left[ \frac{191,191 + 109,146}{191,191} \right]$$

$$= 0,010 \text{ m} = 1 \text{ cm}$$

$$\Delta S_c = \Delta S_{c(1)} + \Delta S_{c(2)}$$

$$= 0,030 + 0,010 = 0,041 \text{ m} = 4,08 \text{ cm}$$

#### 4) Penurunan Izin

Menurut SNI 8460: 2019 pasal 9.2.4.3. Besar penurunan izin < 15 cm +  $\frac{b}{600}$  untuk bangunan tinggi dan bisa dibuktikan struktur masih aman.

- a) Total penurunan Pilar 2

$$S_{g(\text{total})} = S_{g(e)} + \Delta S_c (\text{Pilar 2})$$

$$S_{g(\text{total})} = 3,89 + 1,86 = 5,75 \text{ cm}$$

$$S_{g(\text{izin})} = 15 \text{ cm} + \frac{b}{600} = 15 \text{ cm} + \frac{1780}{600} = 17,967 \text{ cm}$$

Kontrol penurunan,  $S_{g(\text{total})} < S_{g(\text{izin})}$   
 $S_{g(\text{total})} < S_{g(\text{izin})} = 5,75 \text{ cm} < 17,967 \text{ cm}$  (OK)

- b) Total penurunan Pilar 3

$$S_{g(\text{total})} = S_{g(e)} + \Delta S_c (\text{Pilar 3})$$

$$S_{g(\text{total})} = 7,84 + 4,08 = 11,92 \text{ cm}$$

$$S_{g(\text{izin})} = 15 \text{ cm} + \frac{b}{600} = 15 \text{ cm} + \frac{1780}{600} = 17,967 \text{ cm}$$

Kontrol penurunan,  $S_{g(\text{total})} < S_{g(\text{izin})}$   
 $S_{g(\text{total})} < S_{g(\text{izin})} = 11,92 \text{ cm} < 17,967 \text{ cm}$  (OK)

#### H. Metode Pelaksanaan

Metode pelaksanaan fondasi *bored pile* pada *Overpass* Simpang Susun Paiton sebagai berikut.

- 1) Pekerjaan Persiapan
  - a) Pembersihan Lokasi
  - b) Pemasangan *Bowplank*
- 2) Pekerjaan Fondasi *Bored Pile*
  - a) Pekerjaan Pembesian
  - b) Pekerjaan Pengeboran
  - c) Pekerjaan Pengecoran
- 3) Metode Pelaksanaan *Pile Cap*
  - a) Galian tanah *pile cap*
  - b) Urugan pasir pada dasar galian
  - c) Pengecoran lantai kerja
  - d) Pekerjaan bekisting *pile cap*
  - e) Pekerjaan pembesian *pile cap*
  - f) Pengecoran *pile cap*

#### I. Rencana Anggaran Biaya (RAB)

**Tabel 16** Rekapitulasi Rencana Anggaran Biaya (RAB) Pilar 2

| No         | Uraian Pekerjaan                        | Total (Rp)                 |
|------------|-----------------------------------------|----------------------------|
| <b>I</b>   | <b>PEKERJAAN PERSIAPAN</b>              |                            |
| 1          | Pembersihan Lokasi                      |                            |
| 2          | Pemasangan <i>Bowplank</i>              |                            |
|            | <b>Total Harga Pekerjaan Persiapan</b>  | <b>Rp 22.910.586,82</b>    |
| <b>II</b>  | <b>PEKERJAAN BORED PILE</b>             |                            |
| 1          | Pembesian <i>Bored Pile</i>             |                            |
| 2          | Pengeboran <i>Bored Pile</i>            |                            |
| 3          | Pengecoran <i>Bored Pile</i>            |                            |
|            | <b>Total Harga Pekerjaan Bored Pile</b> | <b>Rp 1.636.380.966,68</b> |
| <b>III</b> | <b>PEKERJAAN PILE CAP</b>               |                            |
| 1          | Galian Tanah <i>Pile Cap</i>            |                            |
| 2          | Urugan Tanah <i>Pile Cap</i>            |                            |
| 3          | Pengecoran Lantai Kerja                 |                            |
| 4          | Bekisting <i>Pile Cap</i>               |                            |
| 5          | Pembesian <i>Pile Cap</i>               |                            |
| 6          | Pengecoran <i>Pile Cap</i>              |                            |
|            | <b>Total Harga Pekerjaan Pile Cap</b>   | <b>Rp 837.415.891,41</b>   |
|            | <b>TOTAL NILAI</b>                      | <b>Rp 2.496.707.444,90</b> |
|            | <b>PAJAK PPN 11%</b>                    | <b>Rp 274.637.818,94</b>   |
|            | <b>GRAND TOTAL</b>                      | <b>Rp 2.771.345.263,84</b> |

**Tabel 17** Rekapitulasi Rencana Anggaran Biaya (RAB) Pilar 3

| No         | Uraian Pekerjaan                        | Total (Rp)                 |
|------------|-----------------------------------------|----------------------------|
| <b>I</b>   | <b>PEKERJAAN PERSIAPAN</b>              |                            |
| 1          | Pembersihan Lokasi                      |                            |
| 2          | Pemasangan <i>Bowplank</i>              |                            |
|            | <b>Total Harga Pekerjaan Persiapan</b>  | <b>Rp 30.507.249,09</b>    |
| <b>II</b>  | <b>PEKERJAAN BORED PILE</b>             |                            |
| 1          | Pembesian <i>Bored Pile</i>             |                            |
| 2          | Pengeboran <i>Bored Pile</i>            |                            |
| 3          | Pengecoran <i>Bored Pile</i>            |                            |
|            | <b>Total Harga Pekerjaan Bored Pile</b> | <b>Rp 1.845.649.619,43</b> |
| <b>III</b> | <b>PEKERJAAN PILE CAP</b>               |                            |
| 1          | Galian Tanah <i>Pile Cap</i>            |                            |
| 2          | Urugan Tanah <i>Pile Cap</i>            |                            |
| 3          | Pengecoran Lantai Kerja                 |                            |
| 4          | Bekisting <i>Pile Cap</i>               |                            |
| 5          | Pembesian <i>Pile Cap</i>               |                            |
| 6          | Pengecoran <i>Pile Cap</i>              |                            |
|            | <b>Total Harga Pekerjaan Pile Cap</b>   | <b>Rp 1.278.631.942,93</b> |
|            | <b>TOTAL NILAI</b>                      | <b>Rp 3.154.788.811,45</b> |
|            | <b>PAJAK PPN 11%</b>                    | <b>Rp 347.026.769,26</b>   |
|            | <b>GRAND TOTAL</b>                      | <b>Rp 3.501.815.580,71</b> |

#### 3. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis fondasi *bored pile* pada pilar 2 dan pilar 3 di *Overpass* Simpang Susun Jalan Tol Probolinggo – Banyuwangi Paket 2 yang telah dilakukan, maka beberapa kesimpulan yang diambil antara lain:

- a) Dengan analisis menggunakan *software STAADPro CONNECT Edition V22*, Diperoleh *output* beban vertikal maksimum terbesar yang terjadi pada pilar 2 sebesar 44855,152 kN dan pada pilar 3 sebesar 40929,672 kN yang diakibatkan oleh beban kombinasi KUAT 1.
- b) Perhitungan kapasitas daya dukung fondasi *bored pile* dihitung dengan variasi diameter (0,6 m; 0,8 m; 1,0 m) pada variasi kedalaman (18 m; 20 m; 24 m). Hasil perhitungan kapasitas daya dukung izin kelompok tiang masing-masing dimensi pada pilar 2 yaitu untuk diameter 0,6 m dengan kedalaman 18 m; 20 m; 24 m didapatkan  $Q_{all(g)} = 45781,77$  kN; 138811,93 kN; 50154,61 kN. Untuk diameter 0,8 m dengan kedalaman 18 m; 20 m; 24 m didapatkan  $Q_{all(g)} = 46904,79$  kN; 50367,77 kN; 48711,72 kN. Untuk diameter 1,0 m dengan kedalaman 18 m; 20 m; 24 m didapatkan  $Q_{all(g)} = 47551,99$  kN; 52378,03 kN; 55040,62 kN. Sementara hasil perhitungan kapasitas daya dukung izin kelompok tiang masing-masing dimensi pada pilar 3 yaitu untuk diameter 0,6 m dengan kedalaman 18 m; 20 m; 24 m didapatkan  $Q_{all(g)} = 41330,94$  kN; 41759,31 kN; 43616,67 kN. Untuk diameter 0,8 m dengan kedalaman 18 m; 20 m; 24 m didapatkan  $Q_{all(g)} = 41719,98$  kN; 42618,71 kN; 42899,06 kN. Untuk diameter 1,0 m dengan kedalaman 18 m; 20 m; 24 m didapatkan  $Q_{all(g)} = 41628,55$  kN; 45112,20 kN; 48985,03 kN.
- c) Berdasarkan hasil analisis dengan dimensi yang dipilih yaitu pada pilar 2 dengan diameter 0,8 di kedalaman 24 m menghasilkan nilai penurunan total sebesar  $S_g = 0,057$  m. Hasil analisis dengan dimensi yang dipilih pada pilar 3 dengan diameter 0,8 di kedalaman 20 m menghasilkan nilai penurunan total sebesar  $S_g = 0,119$  m. Dari analisis tersebut menunjukkan bahwa dimensi sudah memenuhi syarat  $S_{g(total)} < S_{g(izin)}$ .
- d) Hasil analisis kapasitas daya dukung dan penurunan pada pilar 2 dan pilar 3 dalam poin 2 dan 3, desain fondasi *bored pile* yang dipilih karena telah memenuhi standar dari segi daya dukung dan penurunan serta efisien dan ekonomis dari segi biaya, yaitu pada pilar 2 fondasi *bored pile* diameter 0,8 m di kedalaman 24 dan berjumlah 24 tiang, serta pilar 3 fondasi *bored pile* diameter 0,8 di kedalaman 20 m dan berjumlah 32 tiang. Didapatkan Rencana

Anggaran Biaya (RAB) yang dibutuhkan pada pilar 2 sebesar Rp. 2.771.345.263,84 dan pada pilar 3 sebesar Rp. 3.501.815.580,71.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ameratunga, J., Sivakugan, N., & Das, B. M. (2016). *Geotechnical Properties of Soils – Fundamentals*. [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2629-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2629-1_2)
- [2] Badan Standardisasi Nasional. (2017). Persyaratan Perancangan Geoteknik. *Standar Nasional Indonesia, 8460*, 1–323.
- [3] Badan Standardisasi Nasional Indonesia. (2008). *SNI 4153: 2008 tentang Cara uji penetrasi lapangan dengan SPT*.
- [4] Badan Standardisasi Nasional Indonesia. (2016a). *SNI 1725: 2016 tentang Pembebanan untuk jembatan*.
- [5] Badan Standardisasi Nasional Indonesia. (2016b). *SNI 2833: 2016 tentang Perencanaan jembatan terhadap beban gempa*.
- [6] Das, B. M. (2019). Principles Of Foundation Engineering. In *Boston: Cengage Learning*.
- [7] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (19 C.E.). *Kumpulan Korelasi Parameter Geoteknik dan Fondasi*.