

ANALISIS DESAIN FONDASI *BORED PILE* PADA PROYEK JALAN TOL PROBOLINGGO - BANYUWANGI PAKET 1

Yunia Maulidiyah¹, Moch. Sholeh², Trias Rahardianto³

Mahasiswa Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan Dan Jembatan, Politeknik Negeri Malang¹, Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang², Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang³

Email: yuniamaulidiyah@gmail.com¹, moch.sholeh@polinema.ac.id², trias.polinema@gmail.com³

ABSTRAK

Overpass SS Kraksaan pada Proyek Pembangunan Jalan tol Probolinggo – Banyuwangi Paket 1 di Kecamatan Kraksaan Kabupaten Probolinggo ada dalam kategori proyek strategis nasional. Bagian *abutment overpass* SS Kraksaan memiliki panjang bentang 20,60 m menggunakan struktur fondasi tiang bor berdiameter 0,8 m dengan kedalaman 28 m. Berbagai literatur telah membahas tentang penggunaan tiang bor pada *abutment*, namun pembahasan tentang pemilihan diameter optimal fondasi tiang bor yang spesifik untuk kondisi dan karakteristik geoteknik di lokasi pembangunan *overpass* SS Kraksaan ini belum dijumpai. Penelitian ini menganalisis alternatif penggunaan *bored pile* pada *abutment overpass* SS Kraksaan dengan variasi diameter 0,6 m, 0,8 m, dan 1 m pada kedalaman 25 m dan 28 m. Perhitungan pembebanan struktur atas bangunan mengacu pada SNI 1725-2016 dan dianalisa menggunakan *software* STAAD.Pro CONNECT Edition V22, dengan memperhitungkan beban gempa yang mengacu pada SNI 2833-2016. Perhitungan daya dukung fondasi menggunakan data pengujian SPT (*Standard Penetration Test*). Perhitungan rencana anggaran biaya menggunakan analisa harga satuan pekerjaan Kota Probolinggo 2023. Hasil analisa menunjukkan bahwa fondasi dengan diameter 0,8 m dan kedalaman 28 m lebih efisien dan efektif dibandingkan alternatif diameter dan kedalaman lain yang ditinjau. Nilai daya dukung kelompok tiang fondasi tersebut adalah 109.318,91 kN dengan jumlah 14 buah tiang dan nilai penurunan kelompok tiang 0,047 cm. Tulangan utama fondasi menggunakan 19D25 dan tulangan geser Ø13-200 mm. Rencana anggaran biaya untuk fondasi tiang *bored pile* dan *pile cap* sebesar Rp 3.397.087.761,14.

Kata kunci : N-SPT, daya dukung, tiang *bored pile*, metode pelaksanaan, RAB

ABSTRACT

The Kraksaan Overpass in the Probolinggo-Banyuwangi Toll Road Project Package 1 at Kraksaan District, Probolinggo Regency, is classified as national strategic projects. The abutment section of the Kraksaan Overpass spans 20.60 meters, utilizing a bored pile foundation structure with 0.8 meters of diameter and 28 meters of depth. Various literatures have discussed the use of bored piles in abutments; however, discussions on the optimal diameter selection of bored pile foundations specific to the geotechnical conditions at the Kraksaan Overpass construction site are still lacking. This study analyzes the alternative implementation of bored piles on the Kraksaan Overpass abutment with diameter variations of 0.6 meters, 0.8 meters, and 1 meter at depths of 25 meters and 28 meters. The structural load design refer to the SNI 1725-2016 utilizing STAAD.Pro CONNECT Edition V22 software for load analysis considering earthquake loads according to the SNI 2833-2016. Foundation bearing capacity was calculated based on the SPT (*Standard Penetration Test*) data. The budget plan calculations use the unit price analysis of Probolinggo City in 2023. The analysis results show that the pile of 0.8 meters diameter and 28 meters depth is more efficient and effective compared to those reviewed diameter and depth alternatives. The bearing capacity value of the pile group is 109,318.91 kN with 14 piles and a group pile settlement value of 0.047 cm. The main reinforcement of the foundation uses 19D25 and shear reinforcement Ø13-200 mm. The budget plan for the bored pile foundation and pile cap is Rp 3,397,087,761.14.

Keywords: N-SPT, bearing capacity, bored pile, implementation method, RAB

1. PENDAHULUAN

Salah satu proyek jalan tol di dalam kategori proyek strategis nasional adalah Proyek Pembangunan Jalan tol Probolinggo – Banyuwangi Paket 1. Pada pekerjaan jalan tol ini terdapat bangunan utama yaitu, bangunan *overpass* dan jembatan. Bangunan tersebut menggunakan struktur bawah fondasi *bored pile* dengan diameter 0,80 m dengan panjang pada 28 m pada kondisi eksistingnya. Fondasi berfungsi untuk meneruskan beban struktur yang ada di atasnya ke lapisan tanah yang ada di bawahnya (Muthmainnah, 2021). kondisi tanah yang berbeda – beda disetiap daerah juga harus diperhatikan dalam perencanaan fondasi. Yoga (2010) melakukan penelitian tentang “Analisis Pondasi Tiang Bor Pada Proyek Jembatan Tambalan II Bantul”, tujuan dari penelitian untuk mengetahui kapasitas dukung dan penurunan terhadap perbedaan diameter pada fondasi tiang bor. Dari penelitian tersebut disimpulkan bahwa semakin besar diameter fondasi tiang bor maka akan semakin besar kapasitas dukung dan semakin besar luasan kelompok tiang semakin besar kapasitas dukung kelompok.

Pengaruh dimensi fondasi tiang bor terhadap daya dukungnya menginspirasi penulisan skripsi ini. Dengan mengambil obyek mengenai fondasi pada *abutment overpass* SS Kraksaan di Proyek Jalan Tol Probolinggo – Banyuwangi Paket 1. Pada skripsi ini akan didesain fondasi tiang bor eksisting berkaitan dengan dimensi, kedalaman dan jumlahnya sehingga diperoleh dimensi fondasi tiang bor yang optimal ditinjau dari segi efisiensi jumlah tiang, jumlah volume beton dan efektivitas waktu pengerjaan.

Tujuan yang ingin dicapai dalam analisis desain fondasi tiang *bored pile* pada proyek jalan tol Probolinggo-Banyuwangi paket 1 (*abutment*) adalah sebagai berikut:

1. Dapat menganalisis pembebanan struktur atas menggunakan *Software STAAD.Pro CONNECT Edition V22*
2. Dapat menganalisis dan mengetahui dimensi fondasi *bored pile* sehingga diperoleh dimensi fondasi yang optimal ditinjau dari segi efisiensi jumlah tiang, jumlah volume beton dan efektivitas waktu pengerjaan
3. Dapat menganalisis dan mengetahui kapasitas daya dukung fondasi *bored pile*
4. Dapat mengetahui penurunan fondasi *bored pile*
5. Mengetahui metode pelaksanaan pekerjaan fondasi *bored pile*
6. Dapat menganalisis Rencana Anggaran Biaya (RAB) pada pekerjaan fondasi *bored pile*

2. METODE

Tahapan dalam penulisan perencanaan fondasi yang akan digunakan meliputi:

- 1) Data
 - a. Data Primer atau data yang diperoleh dari hasil

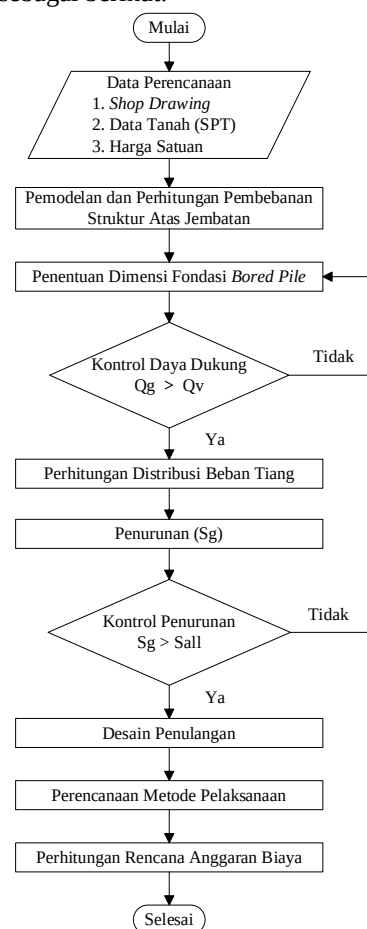
pengamatan langsung, seperti dokumentasi gambar proyek, hasil interview lapangan terkait struktur fondasi atau metode pelaksanaan pekerjaan fondasi

- b. Data sekunder atau data yang sudah tersedia, seperti gambar *shop drawing*, laporan penyelidikan tanah, data laboratorium uji tanah dan data borlog metode SPT

2) Pengolahan data

- a. Perhitungan pembebanan struktur atas jembatan
- b. Perhitungan stabilitas *abutment*
- c. Perencanaan fondasi tiang *bored pile abutment*

Dalam penelitian ini prosedur dan metodologi yang akan digunakan dalam mendesain *bored pile* pada proyek jalan tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 1 ini dapat disajikan dalam diagram alir sebagai berikut:



Gambar 1. Diagram Alir

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

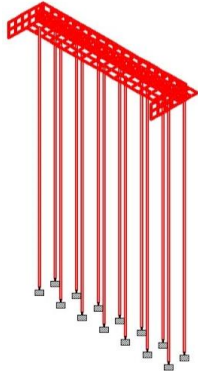
1) Pembebanan Pada Abutment

Dianalisa menggunakan *software STAAD.Pro CONNECT Edition V22* untuk mengetahui beban yang diterima oleh *abutment*. Dengan peraturan yang mengacu pada SNI 1725:2016 tentang pembebanan struktur untuk jembatan. Dimana beban-beban tersebut meliputi beban permanen, beban lalu lintas, beban tekanan tanah, beban

aksi lingkungan, dan beban gesek pada perletakan. Dengan uraian sebagai berikut:

a. Beban sendiri struktur (MS)

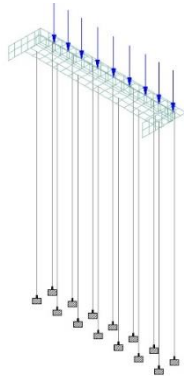
Besarnya beban sendiri dari *abutment* ditampilkan pada Gambar 2. Beban ini didapat dari berat masing-masing material penyusun struktur dihitung menggunakan *software STAAD.Pro CONNECT Edition V22*.



Gambar 2. Beban sendiri struktur (MS)

b. Beban mati tambahan (MA)

Beban mati tambahan berupa beban-beban mati dari struktur atas seperti beban air hujan, beban aspal, beban PC-I Girder dan lain-lain. Beban tersebut didapat dari volume beban dikalikan dengan berat jenis komponen. Total pada perhitungan beban mati tambahan adalah 18826,02 kN dan reaksi setiap perletakan adalah 9413,01 kN. Perletakannya dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Beban mati tambahan (MA)

c. Beban tekanan tanah (TA)

Gaya akibat tekanan tanah yaitu akibat dorongan tanah dibelakang struktur penahan tanah dengan spesifikasi sebagai berikut:

Koefisien tekanan tanah aktif (K_a)

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{0,25}{2} \right) = 0,99$$

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot K_a \cdot h^2 \cdot b = \frac{1}{2} \cdot 15,99 \times 0,9 \times 3,152 \times 17,80 = 1270,87 \text{ kN}$$

$$P_{\text{soil}} = \frac{p_a}{(0,5 \cdot h \cdot b)} = \frac{1270,87}{0,5 \times 3,15 \times 17,80} = 45,33 \text{ kN/m}^2$$

Keterangan:

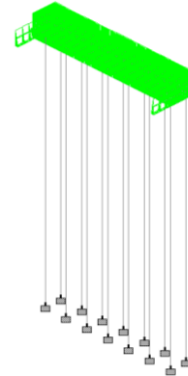
P_a = Tekanan tanah aktif

γ = Tanah urug (t/m^2)

ϕ = Sudut geser ($^\circ$)

b = Lebar bangunan (m)

Perletakan gaya akibat tekanan tanah dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Beban tekanan tanah (TA)

d. Beban lalu lintas

- Beban lajur D

Beban terbagi rata (BTR)

$$q = 9 \left(0,5 + \frac{15}{L} \right) \text{ kPa} = 9 \left(0,5 + \frac{15}{20,60} \right) \text{ kPa} = 11,05 \text{ kN/m}^2$$

Beban garis terpusat (BGT)

$$q = 49,0 \text{ kN/m}$$

- Beban rem (TB)

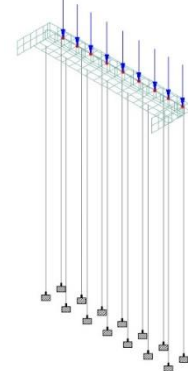
25% dari berat gandar truk desain

5% dari berat truk + beban terbagi rata

Pada beban lalu lintas bisa di akumulasikan sebagai berikut: Beban D 2636,45 kN, beban rem 106,95 kN.

Jadi beban lalu lintas didapat sebesar 2743,40 kN.

Perletakannya dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Beban lalu lintas

e. Beban angin

Beban angin (pada struktur) dapat dilihat pada Gambar 6. Beban ini harus diasumsikan terdistribusi secara merata pada permukaan yang terekspos oleh angin.

$$V_{DZ} = 2,5 \cdot V_o \cdot \left(\frac{V_{10}}{V_B} \right) \cdot \ln \left(\frac{Z}{Z_o} \right)$$

$$= 2,5 \cdot 13,2 \cdot \left(\frac{100}{100}\right) \cdot \ln \cdot \left(\frac{10000}{70}\right) = 163,740 \text{ km/jam}$$

Keterangan:

V_{DZ} = Kecepatan angin pada elevasi rencana (km/jam)

V_o = Kecepatan gesekan angin (km/jam)

Z_o = Panjang gesekan di hulu jembatan (mm)

Z = Elevasi struktur diukur dari permukaan tanah dimana beban angin dihitung ($Z > 10000$ mm)

V_B = kecepatan angin rencana 90 – 126 km/jam

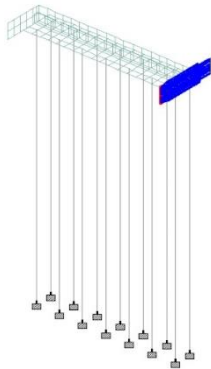
V_{10} = kecepatan angin pada elevasi 10 m diatas permukaan tanah atau diatas permukaan air rencana 90 – 126 km/jam

Maka untuk beban angin pada struktur dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_D = P_B \left(\frac{V_{DZ}}{V_B} \right)^2 = 0,0024 \cdot \left(\frac{163,740}{100} \right)^2 = 0,00643 \text{ Mpa} = 0,643 \text{ kN/m}^2$$

Keterangan:

P_B = tekanan angin dasar (kN/m²)



Gambar 6. Beban angin struktur pada *abutment*

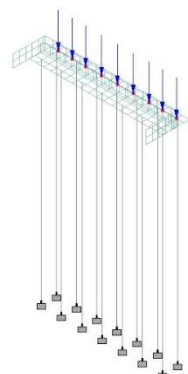
Sedangkan tekanan angin roda kendaraan (E_{WL}) pada Gambar 7. dapat dihitung sebagai berikut:

$$q_{EWL} = 1,46 \text{ kN/m}$$

$$E_{WL} = q_{EWL} \times \sum \text{Lajur} = 1,46 \times 2 = 2,92 \text{ kN/m}$$

Maka dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$L \text{ jembatan} \times q_{EWL} = 20,60 \times 2,92 = 60,152 \text{ kN/m}$$



Gambar 7. Beban angin roda kendaraan

f. Beban gempa (EQ)

Perletakan beban gempa pada Gambar 8. adalah semua beban statik ekuivalen berdasarkan SNI 1725-2016 tentang

Pembebanan untuk Jembatan. Selanjutnya dapat dihitung sebagai berikut:

$$T = 2 \times \pi \sqrt{\frac{W}{g \cdot k}} = 2 \times 3,14 \sqrt{\frac{487,474}{9,8 \cdot 200.000}} = 0,9 \text{ detik}$$

Keterangan:

T = Waktu periode getar (detik)

W = Berat struktur (kN)

k = Konstanta kekakuan (ton)

g = Nilai gravitasi (m/dtk²)

Maka untuk menghitung beban gempa dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$EQ = \frac{C_{sm}}{R} \times W_t = \frac{0,77}{1,5} \times 487,474 = 2502,367 \text{ kN}$$

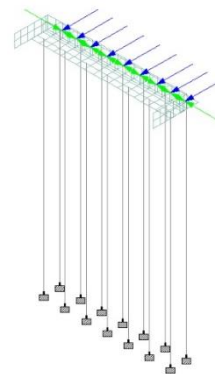
Keterangan:

EQ = Gaya gempa horizontal statis (kN)

C_{sm} = Koefisien respons elastik (g)

R = Faktor modifikasi respons

W_t = Berat total struktur (kN)

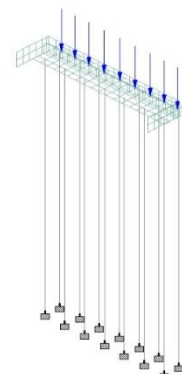


Gambar 8. Beban gempa struktur pada *abutment*

g. Beban gesekan pada perletakan (BF)

Beban gesekan pada perletakan dihitung menggunakan beban tetap dan dikalikan dengan koefisien gesekan ($\mu = 0,15$). Dan untuk perletakannya dapat dilihat pada Gambar 9.

$$BF = \mu \times \text{Beban mati struktur atas} = 0,15 \times 9413,01 = 1411,951 \text{ kN}$$



Gambar 9. Beban gesekan pada perletakan

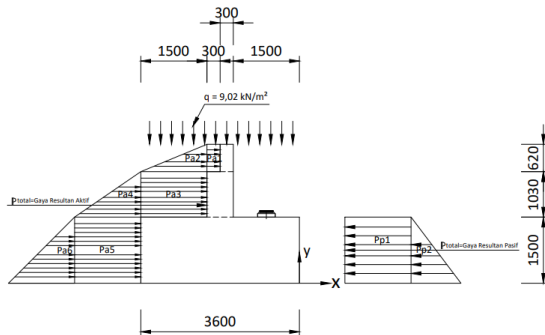
2) Perhitungan Perencanaan Struktur Bawah

Perhitungan ini yang pertama dilakukan kontrol

stabilitas *abutment*, dari kontrol tersebut dapat diketahui aman tidaknya suatu *abutment*. Berikut ini uraiannya:

a) Tekanan tanah lateral pada *abutment*

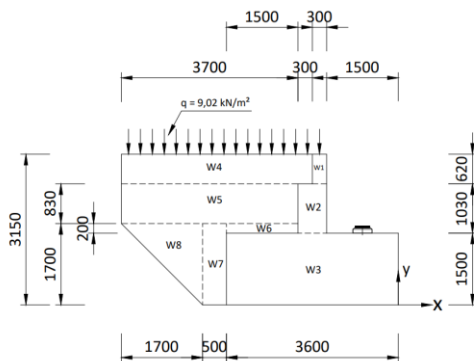
Untuk perhitungan tekanan tanah aktif dan tanah pasif dapat dihitung sesuai dengan diagram tekanan tanah yang telah digambarkan pada Gambar 10 berikut:



Gambar 10. Diagram tekanan tanah pada *abutment*

b) Berat sendiri *abutment* dan *wingwall*

Berat sendiri yang bekerja pada *abutment* jembatan dibagi dalam beberapa segmen seperti disajikan pada Gambar 11 berikut:



Gambar 11. Dimensi bagian-bagian *abutment*

c) Kontrol stabilitas *abutment*

Kontrol ini perlu diperhitungkan dalam perencanaan struktur bawah jembatan atau *abutment* untuk mengetahui kekuatan dari struktur *abutment* tersebut.

a. Faktor terhadap stabilitas guling

Faktor aman *abutment* akibat terhadap penggulingan, dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$F_{gl} = \frac{\sum V \cdot X}{\sum H \cdot Y} \geq FK (2,0)$$

$$F_{gl} = \frac{28015,74}{4410,59} = 6,35 \text{ (OK)}$$

b. Faktor terhadap stabilitas geser

Faktor aman *abutment* akibat terhadap pergeseran, dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$F_{gs} = \frac{tg \cdot \sum V + C \cdot A}{\sum H} \geq FK (1,5)$$

$$F_{gs} = \frac{tg \cdot 0,25 \cdot 17143,61 + 16 \cdot 67,20}{2850,33} = 7,91 \text{ (OK)}$$

c. Faktor terhadap stabilitas daya dukung tanah

Faktor aman *abutment* akibat terhadap daya dukung

tanah, dapat dihitung daya dukung tanah ijin dengan rumus (Mayerhof 1956) sebagai berikut:

$$Q_{ijin} = 8 \cdot N \left(\frac{B + 0,3}{B} \right)^2 = 8 \times 20 \left(\frac{3,6 + 0,3}{3,6} \right)^2 = 187,7 \text{ kN}$$

- Kontrol stabilitas terhadap eksentrisitas

$$e = \left[\frac{B}{2} - \frac{\sum VX - \sum HY}{\sum V} \right] \leq \frac{B}{6}$$

$$= \left[1,8 - \frac{28015,74 - 4410,59}{17143,61} \right] \leq 0,6 \text{ m} = 0,42 \text{ (OK)}$$

Maka untuk faktor aman daya dukung tanah dibawah *abutment* dihitung sebagai berikut:

$$\sigma_{max} = \frac{\sum V}{L \cdot B} \times \left(1 + \frac{6 \cdot e}{B} \right) \leq Q_{ijin} (187,7 \text{ kN})$$

$$\sigma_{max} = \frac{17143,61}{17,8 \cdot 3,6} \times \left(1 + \frac{6 \cdot (0,42)}{3,6} \right) = 456,19 \text{ kN (TIDAK OK)}$$

Berdasarkan hasil perhitungan kontrol stabilitas terhadap daya dukung tanah dibawah *abutment* diperoleh hasil yang tidak memenuhi syarat. Oleh karena itu perlu dilakukan perencanaan fondasi untuk *abutment* tersebut.

3) Perencanaan Fondasi

a. Koreksi N₆₀

Untuk mendapatkan nilai daya dukung ujung tiang dan daya dukung selimut tiang perlu dilakukan perhitungan koreksi nilai N₆₀ (Gambar 12).

$$N_{60} = \frac{Er \cdot Cb \cdot Cs \cdot Cr \cdot N}{0,6}$$

Koreksi alat yang digunakan pengujian SPT yaitu sebagai berikut:

- Menggunakan pemukul Donat Hummer
- Diameter lubang bor
- Tabung sampler
- Panjang batang bor > 10 m

Kedalaman	Deskripsi	N	N ₆₀	N ₆₀ Rata-Rata
0		0	0	
1	Silt clay	0	0	0
2	Silt clay	10	11	11
3	Silt clay	10	11	13
4		13	15	
5		13	15	
6	Silt clay	33	38	27
7		33	38	
8	Silt clay	35	40	39
9		35	40	
10	Poorly graded sand	24	27	34
11		24	27	
12	Sandy silt	38	44	36
13		38	44	
14	Sandy silt	60	69	57
15		60	69	
16	Gravel sand	60	69	69
17		60	69	
18	Gravel sand	60	69	69
19		60	69	
20	Gravel	60	69	69
21		60	69	
22	Gravel	60	69	69
23		60	69	
24	Gravel	60	69	69
25		60	69	
26	Gravel	60	69	69
27		60	69	
28	Gravel	60	69	69
29		60	69	
30	Gravel	60	69	69
31		60	69	
32	Gravel	60	69	69
33		60	69	
34	Gravel	60	69	69
35		60	69	
36	Gravel	60	69	69
37		60	69	
38	Gravel	60	69	69
39		60	69	
40	Gravel	60	69	69

Gambar 12. Koreksi N₆₀

b. Perencanaan daya dukung fondasi tiang *bored pile*

Pada penelitian ini direncanakan fondasi tiang *bored pile* pada beberapa variasi kedalaman yaitu 25 m, 28 m dan beberapa variasi diameter yaitu 0,6 m, 0,8 m, 1 m untuk mendapatkan fondasi yang efisien pada SF 2,5.

1. Daya dukung ujung tiang *bored pile* (Mayerhof 1956)

Perhitungan daya dukung ujung tiang metode Mayerhof dilakukan dengan pertama-tama menghitung nilai N_b berdasarkan ketentuan 8D diatas ujung tiang dan 4D dibawah ujung tiang.

$$Q_p = (40 \times N_b \times A_p) = (40 \times 69 \times 0,50) = 13873,27 \text{ kN}$$

Keterangan:

Q_p = Kapasitas dukung ujung tiang (kN)

N_b = Nilai N-SPT di sekitar ujung tiang

A_p = Luas penampang dasar tiang (m^2)

Dari perhitungan daya dukung ujung tiang (Q_p) diatas dapat direkap hasil dari beberapa diameter dan kedalaman lainnya pada tabel dibawah ini:

Tabel 1. Rekap daya dukung ujung tiang (Q_p)

Item	Diameter 0,6 m		Diameter 0,8 m		Diameter 1 m	
	L (25 m)	L (28 m)	L (25 m)	L (28 m)	L (25 m)	L (28 m)
Q_p (kN)	7803,72	7803,72	13873,27	13873,27	21676,99	21676,99

2. Daya dukung selimut tiang *bored pile* (Mayerhof 1956)

Perhitungan daya dukung selimut tiang metode Mayerhof dilakukan dengan menghitung nilai N disepanjang fondasi dari atas sampai ujung bawah tiang.

$$Q_s = (0,1 \times N \times A_s) = (0,1 \times 54 \times 70,3) = 3798,14 \text{ kN}$$

Keterangan:

Q_s = Kapasitas dukung selimut tiang (kN)

N = Nilai N-SPT di sepanjang tiang

A_s = Luas selimut tiang (m^2)

Dari perhitungan daya dukung selimut tiang (Q_s) diatas dapat direkap hasil dari beberapa diameter dan kedalaman lainnya pada tabel dibawah ini:

Tabel 2. Rekap daya dukung selimut tiang (Q_s)

Item	Diameter 0,6 m		Diameter 0,8 m		Diameter 1 m	
	L (25 m)	L (28 m)	L (25 m)	L (28 m)	L (25 m)	L (28 m)
Q_s (kN)	2458,62	2848,61	3278,16	3798,14	4097,70	4747,68

3. Daya dukung fondasi tiang *bored pile*

Untuk menghitung kapasitas daya dukung ultimit tiang (Q_u) dan kapasitas daya dukung ijin tiang (Q_{all}) sebagai berikut:

$$Q_u = Q_p + Q_s = 13873,27 + 3798,14 = 17671,42 \text{ kN}$$

Sehingga:

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{SF} = \frac{17671,42}{2,5} = 7068,57 \text{ kN}$$

Keterangan:

Q_u = Kapasitas tiang dalam kondisi batas (kN)

Q_p = Kapasitas ujung tiang dalam kondisi batas (kN)

Q_s = Kapasitas friksi tiang dalam kondisi batas (kN)

Q_{all} = Daya dukung ijin tiang (kN)

SF = Faktor keamanan (*safety factory*)

Dari perhitungan daya dukung fondasi diatas dapat direkap hasil dari beberapa diameter dan kedalaman lainnya pada tabel dibawah ini:

Tabel 3. Rekap daya dukung fondasi

Item	Diameter 0,6 m		Diameter 0,8 m		Diameter 1 m	
	L (25 m)	L (28 m)	L (25 m)	L (28 m)	L (25 m)	L (28 m)
Q_u (kN)	10262,34	10652,32	17151,43	17671,42	25774,69	26424,67
Q_{all} (kN)	4104,93	4260,93	6860,57	7068,57	10309,88	10569,87

4. Kontrol jarak fondasi

Pada jenis tanah tertentu, seperti tanah pasir padat, tanah plastis, lanau jenuh dan lainnya, jarak tiang yang terlalu dekat menyebabkan bahaya gerakan tanah secara lateral dan penggembungan tanah. Pada pasir tidak padat, jarak yang dekat lebih disukai karena pengeboran dapat memadatkan tanah disekitar tiang. Untuk itu disarankan agar jarak antara tiang dalam kelompok mempunyai jarak minimum $d = 2,5D$, dan secara umum jarak ini dibuat antara $d = 3 - 3,5D$ dengan D adalah diameter tiang. (Sumber: Hardiatmo, 2005)

5. Penentuan jumlah tiang

Dari analisis *STAAD.Pro CONNECT Edition V22*, beban vertikal yang berkerja (Q_v) bangunan *abutment* sebesar 101.259,94 kN. Maka perhitungan penentuan jumlah tiang *bored pile* sebagai berikut:

$$n = \frac{Q_v}{Q_u} = \frac{101.259,94}{17671,42} = 5,73 \approx 6 \text{ Tiang}$$

Keterangan:

Q_v = Beban vertikal yang berkerja (kN)

Q_u = Kapasitas ultimit tiang (kN)

Dari perhitungan penentuan jumlah tiang diatas dapat direkap hasil dari beberapa diameter dan kedalaman lainnya pada tabel dibawah ini:

Tabel 4. Rekap jumlah tiang

Item	Diameter 0,6 m		Diameter 0,8 m		Diameter 1 m	
	L (25 m)	L (28 m)	L (25 m)	L (28 m)	L (25 m)	L (28 m)
n(buah)	26	24	16	14	12	10

6. Efisiensi kelompok tiang

Perhitungan efisiensi kelompok tiang *bored pile* sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Eff} &= 1 - \arctan \frac{D}{s} \left[\frac{(n-1)m + (m-1)n}{90 \cdot m \cdot n} \right] \\ &= 1 - \arctan \frac{0,8}{2,7} \left[\frac{(7-1)2 + (2-1)7}{90 \times 2 \times 7} \right] = 0,751 \end{aligned}$$

Keterangan:

m = Jumlah baris

n = Jumlah tiang dalam satu baris

θ = $\arctan \frac{d}{s}$ ($^\circ$)

d = Diameter tiang (m)

s = Jarak antar tiang (m)

7. Daya dukung fondasi tiang kelompok

Untuk menghitung kapasitas dukung ultimit

kelompok tiang dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Q_g = \text{Eff} \times n \times Q_{\text{all}} = 14 \times 0,751 \times 7068,6 = 109.318,91 \text{ kN}$$

Dimana $Q_g 109.318,91 \text{ kN} \geq Q_v 101.259,94 \text{ kN}$ (**Ok**)

Keterangan:

Q_g = Kapasitas dukung ultimit kelompok tiang (kN)

n = Jumlah tiang dalam kelompok (buah)

Eff = Nilai efisiensi kelompok tiang (%)

Daya dukung fondasi tiang kelompok dengan variasi diameter dan kedalaman lainnya dapat direkap pada tabel dibawah ini:

Tabel 5. Rekap daya dukung fondasi tiang kelompok

Item	Diameter 0,6 m		Diameter 0,8 m		Diameter 1 m	
	L (25 m)	L (28 m)	L (25 m)	L (28 m)	L (25 m)	L (28 m)
Q_g (kN)	103.364,15	106.261,45	106.761,81	109.318,91	107.006,87	113.282,28

8. Distribusi beban tiang

Perhitungan distribusi beban pada tiang dapat dikategorikan menjadi dua kelompok, yaitu posisi sentris dan eksentris:

- Beban sentris

$$Q = \frac{Q_v}{n} = \frac{101.259,94}{14} = 7232,85 \text{ kN}$$

Keterangan:

Q_v = Beban total vertikal (kN)

n = Jumlah tiang dalam kelompok tiang (buah)

- Beban eksentris

Dari analisis *STAAD.Pro CONNECT Edition V22*, momen pada sumbu y sebesar 1831,85 kNm dan momen pada sumbu x sebesar 1512,65 kNm. Maka dapat dihitung sebagai berikut:

$$Q_i = \frac{Q_v}{n} \pm \frac{M_x \cdot x_i}{\sum x^2} \pm \frac{M_y \cdot y_i}{\sum y^2}$$

$$= \frac{101.259,94}{14} + \frac{1831,85 \times 1}{14} + \frac{1512,65 \times 8,1}{408,24} = 7393,71 \text{ kN}$$

Keterangan:

Q_i = Reaksi tiang atau beban aksial tiang ke-i (kN)

Q_v = Jumlah gaya – gaya vertikal (kN)

n = Jumlah tiang dalam kelompok (buah)

x_i, y_i = Jarak se arah sumbu – x atau sumbu – y dari pusat berat kelompok tiang ke tiang nomer -i (m)

$\sum x^2, \sum y^2$ = Jumlah kuadrat dari jarak tiap tiang ke pusat kelompok tiang.

M_x, M_y = Momen yang bekerja pada bidang yang tegak lurus terhadap sumbu – x atau sumbu – y (kNm)

Hasil perhitungan distribusi beban pada tiang yang lain terhadap eksentris bisa direkap pada tabel dibawah berikut:

Tabel 6. Rekap perhitungan distribusi tiang (Eksentris)

No tiang	X_i	Y_i	X^2	Y^2	Q_i (kN)
1	1	8,1	1	65,61	7393,71
2	1	5,4	1	29,16	7383,71
3	1	2,7	1	7,29	7373,70
4	1	0	1	0	7363,70
5	1	-2,7	1	7,29	7353,69
6	1	-5,4	1	29,16	7343,69
7	1	-8,1	1	65,61	7333,69
8	-1	8,1	1	65,61	7132,02
9	-1	5,4	1	29,16	7122,02
10	-1	2,7	1	7,29	7112,01
11	-1	0	1	0	7102,01
12	-1	-2,7	1	7,29	7092,00
13	-1	-5,4	1	29,16	7082,00
14	-1	-8,1	1	65,61	7071,99
Jumlah (Σ)			14	408,24	101.259,94

Dari tabel perhitungan distribusi beban pada tiang terhadap eksentris diatas untuk tiang nomer satu sampai dengan tiang nomer empat belas dapat diketahui bahwa tiang yang menerima beban paling besar adalah tiang nomer 1 dengan $Q_1 = 7393,71 \text{ kN}$. Sedangkan tiang yang menerima beban paling kecil adalah tiang nomer 14 dengan $Q_{14} = 7071,99 \text{ kN}$

9. Penurunan fondasi

Penurunan fondasi tiang *bored pile* dilakukan perhitungan penurunan segera.

$$q = \frac{Q_g}{L_g \times B_g} = \frac{109.318,912}{1700 \times 280} = 0,156 \text{ kN/cm}^2$$

$$I = 1 - \frac{L_g}{8 \times B_g} \geq 0,50 = 1 - \frac{1700}{8 \times 280} \geq 0,50 = 0,979 \geq 0,50$$

Sehingga,

$$S_{g(e)} = \frac{0,96 \times q \times \sqrt{B_g \times I}}{N_{60}} = \frac{0,96 \times 0,156 \times \sqrt{280 \times 0,979}}{52} = 0,047 \text{ cm}$$

Keterangan:

N_{60} = Nilai SPT rata-rata pada kedalaman B_g dibawah dasar fondasi

L_g = Panjang kelompok tiang (cm)

B_g = Lebar kelompok tiang (cm)

Q_g = Daya dukung kelompok tiang

Dari perhitungan penurunan fondasi diatas dapat direkap hasil dari beberapa diameter dan kedalaman lainnya pada tabel dibawah ini:

Tabel 7. Rekap penurunan fondasi

Item	Diameter 0,6 m		Diameter 0,8 m		Diameter 1 m	
	L (25 m)	L (28 m)	L (25 m)	L (28 m)	L (25 m)	L (28 m)
$S_{g(e)}$ (cm)	0,073	0,045	0,071	0,047	0,077	0,056

Adapun perhitungan penurunan izin didasarkan sesuai SNI 8640-2017 sebagai berikut:

$$S_{ijin} = 15 + \frac{B}{600} = 15 + \frac{360}{600} = 15,6 \text{ cm}$$

Dari beberapa perhitungan perencanaan fondasi pada *Abutment* dapat dirangkum data-data pemilihan diameter

dan kedalaman sebagai berikut:

Tabel 8. Rekapitulasi pemilihan diameter

Item	Diameter 0,6 m		Diameter 0,8 m		Diameter 1 m	
	L (25 m)	L (28 m)	L (25 m)	L (28 m)	L (25 m)	L (28 m)
n (buah)	26	24	16	14	12	10
Qg (kN)	103.364,15	106.261,45	106.761,81	109.318,91	107.006,87	113.282,28
S _{g(e)} (cm)	0,073	0,045	0,071	0,047	0,077	0,056
Vol. Beton (m ³)	184	190	201	197	236	220

Berdasarkan tabel diatas dapat disimpulkan bahwa fondasi *bored pile* diameter 0,6 kedalaman 25 adalah yang paling efisien ditinjau dari volume beton yang digunakan. Namun dalam hal ini diameter 0,8 kedalaman 28 dipilih karena mempertimbangkan efisiensi dari efektivitas pada jumlah tiang. Sedangkan dari segi daya dukung kelompok tiang nilainya tidak terlalu dekat dengan beban yang diterima (Qv). Jadi berdasarkan pertimbangan di atas, maka dalam perencanaan ini dipilih diameter 0,8 m dengan kedalaman 28 m. Dalam perhitungan-perhitungan selanjutnya penulangan fondasi dan perhitungan rencana anggaran biaya menggunakan diameter 0,8 m dengan kedalaman 28 m.

4) Perencanaan Penulangan Fondasi dan Pile cap

Dengan ketentuan yang mengacu pada SNI 2847-2019 perencanaan dapat diuraikan sebagai berikut:

a. Penulangan Pile cap

Penulangan pada *pile cap* terdiri atas tulangan arah sumbu x dan sumbu y. Dimana setiap setiap penulangannya dibutuhkan tulangan tarik dan tulangan tekan. Pada perhitungan ini gaya dan momen didapat dari *STAAD.Pro CONNECT Edition V22*.

- Arah X

Mu = 1512,65 kNm = 1512650000 Nmm

Pu = 0,253 N/mm²

1. Faktor tahanan(Rn)

$$R_n = \frac{Mu}{\phi \times b \times d^2} = \frac{1512650000}{0,9 \times 10000 \times 1120^2} = 13,40$$

2. Rasio tulangan(ρ)

$$\begin{aligned} \rho_{\text{perlu}} &= \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R_n}{f_y}} \right) \\ &= \frac{1}{15,686} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 15,686 \times 13,40}{400}} \right) \\ &= 0,0016 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan diatas diperoleh nilai $\rho_{\text{perlu}} < \rho_{\text{min}}$ maka digunakan $\rho_{\text{min}} = 0,0035$

3. Luas tulangan(A_s)

$$A_s = \rho_{\text{min}} \cdot b \cdot d = 0,0035 \times 10000 \times 1120 = 39200 \text{ mm}^2$$

Maka A_s' digunakan dari 50% A_s

$$A_s' = 50\% \cdot A_s = 50\% \times 39200 = 19600 \text{ mm}^2$$

4. Tinggi penampang beton tertekan(a_b)

$$a_b = C_b \cdot \beta_1 = 672 \times 0,85 = 571,20 \text{ mm}$$

5. Kuat tekan baja(f_s')

$$f_s' = \epsilon_s' \cdot E_{\text{baja}} = 0,0026 \times 200000 = 529 \text{ Mpa}$$

$$f_s' > f_y \text{ maka } f_s' = f_y = 400 \text{ Mpa}$$

6. Gaya tekan nominal(P_n)

$$\begin{aligned} P_n &= 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot d \left(\frac{h - 2 \cdot e}{2 \cdot d} + \sqrt{\left(\frac{h - 2 \cdot e}{2 \cdot d} \right)^2 + 2 \cdot m \cdot \rho \left(2 - \frac{d'}{d} \right)} \right) \\ &= 0,85 \times 30 \times 10000 \times 1120 \left(-43,9 + \sqrt{(-43,9)^2 + 2 \times 15,686 \times 0,0035 \times 1,929} \right) \\ &= 69020268 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\phi \cdot P_n = 0,9 \times 69020268 = 62118241 \text{ N} > 3036000 \text{ N}$$

$\phi P_n > P_u$ maka, OK

7. Pemilihan tulangan

$A_s = 39200 \text{ mm}^2$ jika dipakai tulangan D32 maka,

$$s = \frac{0,25 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot b}{A_s} = \frac{0,25 \times \pi \times 32^2 \times 10000}{39200} = 205,061 \approx 200 \text{ mm}$$

$A_s' = 19600 \text{ mm}^2$ jika dipakai tulangan D25 maka,

$$s = \frac{0,25 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot b}{A_s'} = \frac{0,25 \times \pi \times 25^2 \times 10000}{19600} = 250,319 \approx 250 \text{ mm}$$

- Arah Y

Mu = 1831,85 kNm = 1831850000 Nmm

Pu = 1,083 N/mm²

1. Faktor tahanan(R_n)

$$R_n = \frac{Mu}{\phi \times b \times d^2} = \frac{1831850000}{0,9 \times 10000 \times 1080^2} = 0,175$$

2. Rasio tulangan(ρ)

$$\begin{aligned} \rho_{\text{perlu}} &= \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R_n}{f_y}} \right) \\ &= \frac{1}{15,686} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 15,686 \times 0,175}{400}} \right) \\ &= 0,00043 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan diatas diperoleh nilai

$\rho_{\text{perlu}} < \rho_{\text{min}}$ maka digunakan $\rho_{\text{min}} = 0,0035$

3. Luas tulangan(A_s)

$$A_s = \rho_{\text{min}} \cdot b \cdot d = 0,0035 \times 10000 \times 1080 = 37800 \text{ mm}^2$$

Maka A_s' digunakan dari 50% A_s

$$A_s' = 50\% \cdot A_s = 50\% \times 37800 = 18900 \text{ mm}^2$$

4. Tinggi penampang beton tertekan(a_b)

$$a_b = C_b \cdot \beta_1 = 648 \times 0,85 = 551 \text{ mm}$$

5. Kuat tekan baja(f_s')

$$f_s' = \epsilon_s' \cdot E_{\text{baja}} = 0,0024 \times 200000 = 489 \text{ Mpa}$$

$$f_s' > f_y \text{ maka } f_s' = f_y = 400 \text{ Mpa}$$

6. Gaya tekan nominal(P_n)

$$\begin{aligned} P_n &= 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot d \left(\frac{h - 2 \cdot e}{2 \cdot d} + \sqrt{\left(\frac{h - 2 \cdot e}{2 \cdot d} \right)^2 + 2 \cdot m \cdot \rho \left(2 - \frac{d'}{d} \right)} \right) \\ &= 0,85 \times 30 \times 10000 \times 1080 \left(0,425 + \sqrt{(0,425)^2 + 2 \times 15,686 \times 0,0035 \times 1,889} \right) \\ &= 288682402,1 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\phi \cdot P_n = 0,9 \times 288682402,1 = 259814161,9 \text{ N} > 12996000 \text{ N}$$

$\phi P_n > P_u$ maka, OK

7. Pemilihan tulangan

$A_s = 37800 \text{ mm}^2$ jika dipakai tulangan D32 maka,

$$s = \frac{0,25 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot b}{A_s} = \frac{0,25 \times \pi \times 32^2 \times 10000}{37800} = 212,66 \approx 200 \text{ mm}$$

$A_s' = 18900 \text{ mm}^2$ jika dipakai tulangan D25 maka,

$$s = \frac{0,25 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot b}{A_s'} = \frac{0,25 \times \pi \times 25^2 \times 10000}{18900} = 259,59 \approx 250 \text{ mm}$$

b. Penulangan Fondasi Bored Pile

Pada perhitungan tulangan ada dua yang akan dihitung yaitu untuk tulangan utama dan tulangan geser.

- Tulangan utama

$$M_u = 2619,387 \text{ kNm} = 2619387000 \text{ Nmm}$$

$$P_u = 5967,721 \text{ kN} = 5967721 \text{ N}$$

1. Faktor tahanan(R_n)

$$R_n = \frac{M_u}{\phi \times b \times d^2} = \frac{2619387000}{0,9 \times 800 \times 700^2} = 7,425$$

2. Rasio tulangan(ρ)

$$\begin{aligned} \rho_{\text{perlu}} &= \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R_n}{f_y}} \right) \\ &= \frac{1}{16,471} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 16,471 \times 8,353}{420}} \right) \\ &= 0,014 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan diatas diperoleh nilai $\rho_{\text{min}} < \rho_{\text{perlu}} < \rho_{\text{maks}}$ maka digunakan $\rho_{\text{perlu}} = 0,0014$

3. Luas tulangan(A_s)

$$A_s = \rho_{\text{min}} \cdot b \cdot d = 0,014 \times 800 \times 700 = 4756 \text{ mm}^2$$

4. Tinggi penampang beton tertekan(a_b)

$$a_b = C_b \cdot \beta_1 = 412 \times 0,85 = 350 \text{ mm}$$

5. Kuat tekan baja(f_s')

$$f_s' = \epsilon_s' \cdot E_{\text{baja}} = 0,0023 \times 200000 = 454,29 \text{ Mpa}$$

$f_s' > f_y$ maka $f_s' = f_y = 420 \text{ Mpa}$

6. Gaya tekan nominal(P_n)

$$\begin{aligned} P_n &= 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot d \left(\frac{h - 2 \cdot e}{2 \cdot d} + \sqrt{\left(\frac{h - 2 \cdot e}{2 \cdot d} \right)^2 + 2 \cdot m \cdot \rho \left(2 - \frac{d'}{d} \right)} \right) \\ &= 0,85 \times 30 \times 800 \times 700 (-0,06 + \sqrt{(-0,06)^2 + 2 \times 16,471 \times 0,014 (1,857)}) \\ &= 118842654 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\phi \cdot P_n = 0,9 \times 118842654 = 106958388 \text{ N} > 5967721 \text{ N}$$

$\phi P_n > P_u$ maka, OK

7. Pemilihan tulangan

$$A_s = A_s + A_s' = 4756 + 4756 = 9512 \text{ mm}^2$$

jika dipakai tulangan D25 maka,

$$n = \frac{A_s}{0,25 \cdot \pi \cdot D^2} = \frac{28112}{0,25 \times \pi \times 25^2} = 19,39 \approx 19 \text{ mm}$$

- Tulangan geser

$$V_u = 501,348 \text{ kN} = 501348 \text{ N}$$

1. Kuat geser beton(V_c)

$$\begin{aligned} \phi V_c &= 0,75 \cdot \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d \\ &= 0,75 \times \frac{1}{6} \times \sqrt{30} \times 800 \times 700 \\ &= 398742,021 \text{ N} < 501348 \text{ N} \end{aligned}$$

$\phi V_c < V_u$, maka dihitung S_{perlu}

2. Kuat geser baja perlu ($V_{s \text{ perlu}}$)

$$\begin{aligned} \phi V_{s \text{ perlu}} &= \frac{V_u - \phi V_c}{\phi} \\ &= \frac{501348 - 398742,021}{0,75} = 136808,47 \text{ N} \end{aligned}$$

3. Pemilihan tulangan

Misal digunakan tulangan Ø13 maka:

$$A_v = 2 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = 2 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 13^2 = 265,33 \text{ mm}^2$$

$$S = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{\phi V_{s \text{ perlu}}} = \frac{265,33 \times 240 \times 700}{136808,47} = 325,82 \text{ mm}$$

$$S_{\text{min}} = \frac{3 \cdot A_v \cdot f_y}{b_w} = \frac{3 \times 265,33 \times 240}{800} = 238,80 \approx 200 \text{ mm}$$

$S < S_{\text{min}}$ maka, digunakan S_{min}

5) Metode Pelaksanaan

Metode pelaksanaan tiang *bored pile* pada *abutment* dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

- Pekerjaan persiapan dan mobilisasi alat berat
- Fabrikasi tulangan
- Penentuan titik pengeboran dan pengukuran
- Proses pengeboran
- Penginstallan tulangan dan pengecoran
- Pembesian untuk *pile cap* (*abutment*)
- Bekisting pada *pile cap* dan pengecoran (*abutment*)

6) Rencana Anggaran Biaya

Perhitungan RAB dapat dihitung dengan cara menghitung banyaknya volume pekerjaan lalu dikalikan dengan harga satuan pekerjaan sehingga didapatkan jumlah biaya pekerjaan. Dalam penulisan ini perhitungan rencana anggaran biaya didsari oleh AHSP Kota Probolinggo tahun 2023 dibatasi hanya untuk pelaksanaan fondasi dengan diameter 0,8 m kedalaman 28 m.

4. KESIMPULAN

Dari hasil Analisis Desain Fondasi *Bored pile* Pada Proyek Jalan Tol Probolinggo – Banyuwangi Paket 1 didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Nilai beban struktur atas bangunan menggunakan hasil analisis *STAAD.Pro CONNECT Edition V22* yang telah terkombinasi. Untuk perencanaan fondasi didapat beban vertikal yang bekerja (Q_v) adalah 101.259,94 kN dari kombinasi beban EKSTREM I.
- 2) Dari beberapa perencanaan dimensi 0,6 m, 0,8 m, 1 m dengan variasi kedalaman 25 m dan 28 m didapat dimensi fondasi tiang *bored pile* yang optimal ditinjau dari segi efisiensi jumlah tiang, jumlah volume beton dan efektivitas waktu pengerjaan pada *abutment* yaitu dengan diameter 0,80 m kedalaman 28 m.
- 3) Daya dukung kelompok dengan 14 tiang adalah 109.318,912 kN, dimana beban yang diterima (Q_v) adalah 101.259,94 kN.
- 4) Penurunan pada fondasi tiang *bored pile* dengan diameter 0,80 m dan panjang tiang 28 m dengan jumlah tiang sebanyak 14 tiang, sesuai dengan perhitungan yang berdasarkan pada data tanah N-SPT didapat nilai penurunan sebesar 0,047 cm.
- 5) Dimensi penulangan *pile cap* pada tulangan bawah arah y adalah D32-200 sedangkan tulangan atas arah y D25-250. Tulangan bawah arah x adalah D32-200 sedangkan pada tulangan atas arah x D25-250. Dan tulangan utama tiang 19 D25 dengan tulangan geser Ø13-200 mm.
- 6) Metode pelaksanaan pekerjaan fondasi *bored pile* diawali dengan pekerjaan persiapan dan mobilisasi alat berat, fabrikasi tulangan, penentuan titik pengeboran dan pengukuran, proses pengeboran, penginstallan tulangan dan pengecoran, pembesian untuk *pile cap* (*abutment*), bekisting pada *pile cap* dan pengecoran.
- 7) Perhitungan rencana anggaran biaya struktur fondasi dan

pile cap pada *Overpass* SS Kraksaan sebesar Rp 3.397.087.761,14.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yoga, F. (2010) ‘Analisis Pondasi Tiang Bor Pada Proyek Jembatan Tambalan II Bantul. Tugas Akhir. Universitas Islam Yogyakarta
- [2] Badan Standardisasi Nasional Indonesia (2016) ‘Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa SNI 2833’
- [3] Badan Standardisasi Nasional Indonesia (2016) ‘Pembebanan Untuk Jembatan SNI 1725’
- [4] Das, B. M. (1995a). Mekanika Tanah Jilid 1(Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik. Penerbit Erlangga, 1–300.
- [5] Das, B. M. (1995b). Rekayasa Geoteknis). Erlangga, 258.
- [6] Bowles, J. E. (2005). Analisis Dan Desain Pondasi II. Erlangga, Jakarta, 2, 474.
- [7] Dr. Ir. Hary Christady Hardiyatmo, M. E. D. (1992). Mekanika Tanah II. Gadjah Mada University Press, 91(5), 1–398.
- [8] Das, Braja M. (2019). Principles of Foundation Engineering, SI Edition 9th
- [9] Nasional, S., Ics, I., & Nasional, B. S. (2008). SNI 4153 - 2008. Cara uji penetrasi lapangan
- [10] Jenderal, D., & Konstruksi, B. (2023). Surat Edara No. 73/SE/Dk/2023. Tata Cara Penyusunan Perkiraan Biaya Pekerjaan Konstruksi Bidang Pekerjaan Umum
- [11] Fajri Nurul Hakim, M., & Abdul Hadi, M. (2023). Analisis Daya Dukung dan Penurunan Pondasi Berdasarkan Data N-SPT. 3(1), 236–247.
- [12] Badan Standardisasi Nasional Indonesia (2017) ‘Tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik SNI 8460’