

OPTIMASI FONDASI TIANG BOR BETON JEMBATAN STA. 43+425 JALAN TOL PROBOLINGGO-BANYUWANGI PAKET 3

¹Yerry Kahaditu Firmansyah, ²Muhammad Salman Mukhtar, ³Muhammad Aditya Wibowo

Teknik Sipil, Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

Email: ⁽¹⁾yerry.kahaditu.ts@upnjatim.ac.id, ⁽²⁾220235010099@student.upnjatim.ac.id,

⁽³⁾22035010108@student.upnjatim.ac.id

Abstract

This study discusses the optimization of bored pile foundations on the STA. 43+425 Bridge, Probolinggo–Banyuwangi Toll Road Package 3 to improve technical and economic efficiency. The existing design uses bored piles with a diameter of 0.8 m with a total of 68 piles per abutment. The results of soil investigations using the Standard Penetration Test (SPT) show an increase in the NSPT value at a depth of 22–24 m, thus providing an opportunity to increase the bearing capacity of the piles through dimensional modifications. The scope of the study includes a comparison of the bearing capacity of single and group piles between the existing and optimized designs, as well as an evaluation of their effects on the efficiency of the number of piles and construction costs. The analysis method uses the Reese & Wright approach to calculate the ultimate bearing capacity in cohesive and non-cohesive soils, and the Converse–Labarre method to determine the efficiency of the pile group. The data analyzed include drilling records, foundation geometry, structural loading, and unit price of work. Two scenarios are compared, namely the existing diameter of 0.8 m and the optimized diameter of 1.2 m. The results showed a significant increase in the permissible bearing capacity of a single pile, from 187.05 tons to 327.53 tons at abutment 1, and from 184.07 tons to 330.71 tons at abutment 2. The number of piles could be reduced from 68 to 32 piles per abutment, while the group bearing capacity still exceeded the maximum axial load. The optimization also resulted in cost savings of Rp631,882,080, so the foundation design was considered more effective and economical.

Keywords: Bored pile, Pile bearing capacity, SPT, Foundation optimization, Pile group efficiency

Abstrak

Penelitian ini membahas optimasi fondasi tiang bor pada Jembatan STA. 43+425 Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3 untuk meningkatkan efisiensi teknis dan ekonomis. Desain eksisting menggunakan tiang bor berdiameter 0,8 m dengan total 68 tiang per abutment. Hasil penyelidikan tanah melalui uji Standard Penetration Test (SPT) menunjukkan peningkatan nilai NSPT pada kedalaman 22–24 m, sehingga memberikan peluang untuk meningkatkan kapasitas daya dukung tiang melalui modifikasi dimensi. Ruang lingkup penelitian mencakup perbandingan kapasitas daya dukung tiang tunggal dan kelompok antara desain eksisting dan desain optimasi, serta evaluasi pengaruhnya terhadap efisiensi jumlah tiang dan biaya konstruksi. Metode analisis menggunakan pendekatan Reese & Wright untuk menghitung daya dukung ultimit pada tanah kohesif dan non-kohesif, serta metode Converse–Labarre untuk menentukan efisiensi kelompok tiang. Data yang dianalisis meliputi catatan pengeboran, geometri fondasi, pembebanan struktur, dan harga satuan pekerjaan. Dua skenario dibandingkan, yaitu diameter eksisting 0,8 m dan diameter optimasi 1,2 m. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan signifikan pada daya dukung izin tiang tunggal, dari 187,05 ton menjadi 327,53 ton pada abutment 1, dan dari 184,07 ton menjadi 330,71 ton pada abutment 2. Jumlah tiang dapat dikurangi dari 68 menjadi 32 tiang per abutment, sementara daya dukung kelompok tetap melebihi beban aksial maksimum. Optimasi juga menghasilkan penghematan biaya sebesar Rp631.882.080, sehingga desain fondasi dinilai lebih efektif dan ekonomis.

Kata kunci: Tiang bor, Daya dukung tiang, SPT, Optimasi fondasi, Efisiensi kelompok tiang

1. PENDAHULUAN

Jembatan adalah sarana transportasi yang mempunyai peranan penting bagi kelancaran pergerakan lalu lintas. Dimana fungsi jembatan adalah menghubungkan rute/lintasan transportasi yang terpisah baik oleh sungai, rawa, danau, selat, saluran, jalan raya, jalan kereta api dan perlintasan lainnya [1]. Peningkatan kebutuhan infrastruktur transportasi, khususnya jalan tol, menuntut perencanaan struktur yang kuat, aman, dan efisien, terutama pada bagian fondasi jembatan. Fondasi merupakan bagian konstruksi yang berfungsi untuk meneruskan beban dari struktur atas ke tanah dasar pondasi yang cukup kuat menahannya tanpa terjadi *differential settlement* pada sistem strukturnya [2]. Fondasi tiang bor adalah fondasi yang dibangun dengan cara mengebor tanah terlebih dahulu kemudian diisi dengan tulangan lalu dicor [3]. Fondasi tiang bor (*bored pile*) umum digunakan pada kondisi tanah lunak hingga sedang karena fleksibilitas metode pelaksanaannya dan kemampuannya menahan beban aksial yang besar. Fondasi tiang bor tergolong sebagai tipe fondasi dalam berdasarkan kategori teknik fondasi, karena memiliki kemampuan untuk menyalurkan beban dari struktur ke lapisan tanah yang kuat berada jauh di bawah permukaan tanah [4]. Kuat dukung tiang bor diperoleh dari kuat dukung ujung (*end bearing capacity*), yang diperoleh dari tekanan ujung tiang dan kuat dukung geser atau selimut (*friction bearing capacity*) yang diperoleh dari kuat dukung gesek atau gaya adhesi antara tiang bor dan tanah disekelilingnya [5].

Pada Jembatan STA. 43+425 Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3, desain eksisting menggunakan tiang bor berdiameter 0,8 m dengan jumlah 68 tiang per *abutment*. Optimasi dimensi tiang dapat meningkatkan kapasitas daya dukung sekaligus mengurangi kebutuhan jumlah tiang tanpa menurunkan stabilitas struktur. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengkaji apakah peningkatan diameter tiang dari 0,8 m menjadi 1,2 m mampu memberikan peningkatan daya dukung yang cukup untuk mengurangi jumlah tiang dan menekan biaya konstruksi. Dengan hipotesis bahwa peningkatan diameter tiang mampu

meningkatkan kapasitas daya dukung secara signifikan sehingga jumlah tiang dapat dikurangi tanpa mengurangi faktor keamanan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perbandingan kapasitas daya dukung, efisiensi kelompok tiang, serta dampak perubahan desain terhadap biaya konstruksi. Diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi acuan dalam perencanaan fondasi jembatan di masa mendatang, sekaligus membuka peluang pengembangan desain fondasi yang lebih efektif, ekonomis, dan berkelanjutan di proyek-proyek infrastruktur serupa.

2. ISI

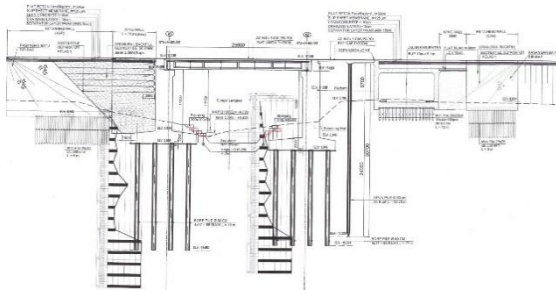
Penelitian ini dilakukan berdasarkan data sekunder dari proyek Jembatan Utama STA. 43+425 Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3. Tahap preparasi dimulai dengan pengumpulan dan penyortiran data geoteknik berupa hasil uji *Standard Penetration Test* (SPT). SPT adalah suatu metode uji yang dilaksanakan bersamaan dengan pengeboran untuk mengetahui, baik perlawanan dinamik tanah maupun pengambilan contoh terganggu dengan teknik penumbukan [6]. Dari beberapa titik bor di sekitar lokasi jembatan, yang kemudian dikorelasikan untuk memperoleh parameter tanah tiap lapisan berupa nilai N-SPT, jenis tanah dan kedalaman lapisan. Data geometrik fondasi eksisting berupa diameter tiang 0,8 m, panjang tiang 24 m, serta konfigurasi kelompok tiang sebanyak 68 buah per *abutment* digunakan sebagai kondisi awal pembandingan.

Selanjutnya dilakukan penyiapan model desain alternatif dengan memodifikasi diameter tiang menjadi 1,2 m, sementara panjang tiang dan kedalaman penetrasi dijaga tetap sama untuk menjaga kesetaraan kondisi analisis. Perhitungan daya dukung tiang tunggal dilakukan menggunakan metode Reese & Wright yang mempertimbangkan tahanan ujung (*end bearing*) dan tahanan gesek selimut (*skin friction*) pada setiap lapisan tanah. Untuk kelompok tiang, digunakan persamaan Converse–Labarre guna menentukan efisiensi kelompok berdasarkan jarak antartiang dan susunan konfigurasi *pile group*.

Perhitungan dilakukan untuk dua skenario (eksisting dan optimasi) dengan replikasi analisis pada tiap titik *bore log* yang tersedia. Tahap akhir berupa analisis biaya dengan mengacu pada *bill of quantities* untuk menentukan perbandingan total biaya antara desain eksisting dan desain optimasi.

2.1. Detail Fondasi Tiang

Lokasi pekerjaan pengeboran tiang berada di *abutment* 1 dan *abutment* 2 Jembatan STA. 43+425. Kegiatan pengeboran dilaksanakan pada area yang direncanakan sebagai titik-titik fondasi utama struktur *abutment*.



Gambar 1. Potongan memanjang Jembatan STA. 43+425 Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3

Data tiang pada Jembatan STA. 43+425 Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3 adalah sebagai berikut:

1. Jenis fondasi tiang : Tiang bor beton
2. Panjang tiang : 19 m (*abutment* 1)
: 17 m (*abutment* 2)
3. Kedalaman tiang : 22 m (*abutment* 1)
: 24 m (*abutment* 2)

2.2. Pembebanan Fondasi Tiang

Tabel 1 dan 2 berisi data pembebanan yang diolah kembali menjadi kombinasi pembebanan. Berikut adalah hasil analisis struktur kombinasi pembebanan gaya aksial yang diambil nilai terbesar saja.

Tabel 1. Gaya aksial *abutment* 1 Jembatan STA. 43+425 Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3

Tipe	Aksial (ton)
Permanen	10244,28
Temperatur	10244,28
Gempa	9323,39

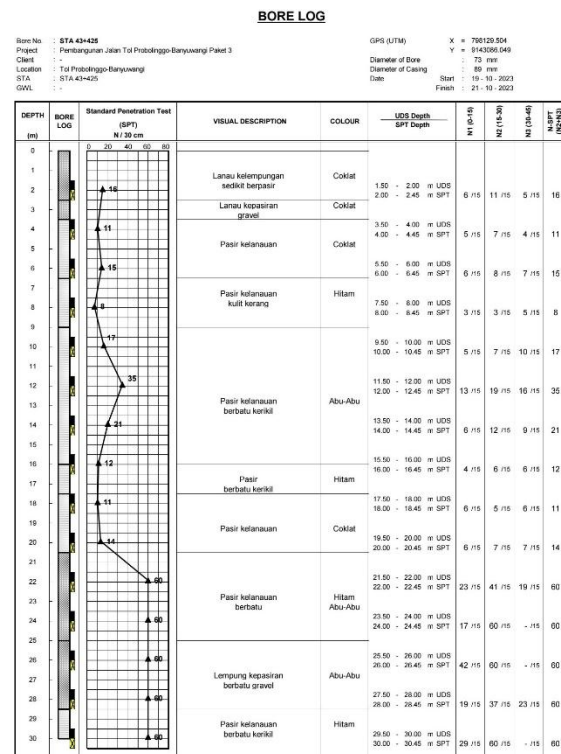
Tabel 2. Gaya aksial *abutment* 2 Jembatan STA. 43+425 Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3

Tipe	Aksial (ton)
Permanen	9509,19
Temperatur	9509,19
Gempa	8551,91

Hasil kombinasi beban terbesar yang nantinya akan digunakan untuk kontrol beban pada daya dukung tiang.

2.3. Kondisi Tanah Dasar Tiang

Untuk pengambilan data penyelidikan tanah menggunakan *Standard Penetration Test*. Hasil penyelidikan lapangan berupa data *bore log* pada Gambar 2 dan Gambar 3. Karakteristik dijelaskan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

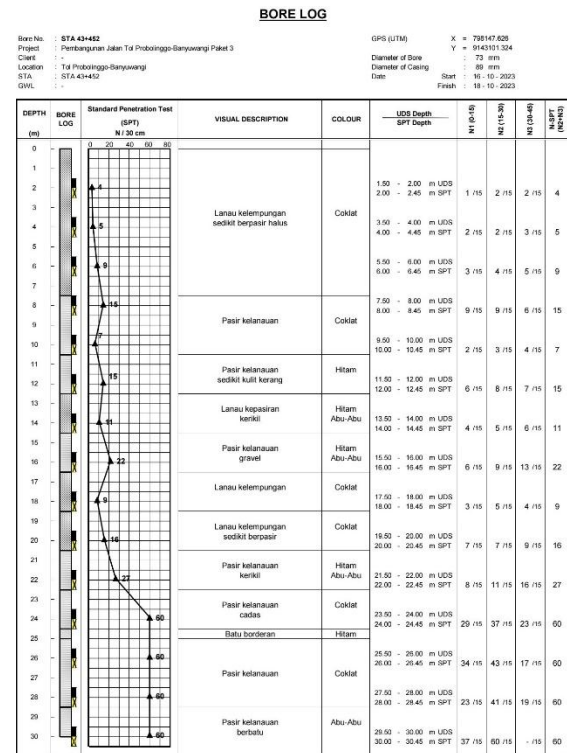


Gambar 2. Bore log *abutment* 1 Jembatan STA. 43+425 Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3

Tabel 3. Data karakteristik *bore log* *abutment* 1 Jembatan STA. 43+425 Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	Karakteristik Tanah	NSPT
1	Tanah	Kohesif	16

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	Karakteristik Tanah	NSPT
2	Liat	Kohesif	16
3	Tanah Liat	Kohesif	13
4	Pasir	Non-Kohesif	11
5	Pasir	Non-Kohesif	12
6	Pasir	Non-Kohesif	15
7	Pasir	Non-Kohesif	10
8	Pasir	Non-Kohesif	8
9	Pasir	Non-Kohesif	12
10	Pasir	Non-Kohesif	17
11	Pasir	Non-Kohesif	26
12	Pasir	Non-Kohesif	35
13	Pasir	Non-Kohesif	26
14	Pasir	Non-Kohesif	21
15	Pasir	Non-Kohesif	17
16	Pasir	Non-Kohesif	12
17	Pasir	Non-Kohesif	11
18	Pasir	Non-Kohesif	11
19	Pasir	Non-Kohesif	12
20	Pasir	Non-Kohesif	14
21	Pasir	Non-Kohesif	29
22	Pasir	Non-Kohesif	60
23	Pasir	Non-Kohesif	60
24	Pasir	Non-Kohesif	60
25	Pasir	Non-Kohesif	60
26	Pasir	Non-Kohesif	60
27	Pasir	Non-Kohesif	60
28	Pasir	Non-Kohesif	60
29	Pasir	Non-Kohesif	60
30	Pasir	Non-Kohesif	60



Gambar 3. Bore log abutment 2 Jembatan STA. 43+425 Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3

Tabel 4. Data karakteristik bore log abutment 2 Jembatan STA. 43+425 Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3

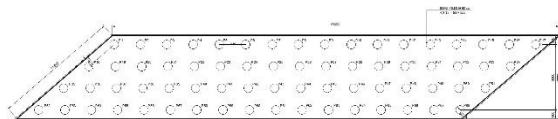
Kedalaman (m)	Jenis Tanah	Karakteristik Tanah	NSPT
1	Tanah Liat	Kohesif	4
2	Tanah Liat	Kohesif	4
3	Tanah Liat	Kohesif	4,5
4	Pasir	Non-Kohesif	5
5	Pasir	Non-Kohesif	7
6	Pasir	Non-Kohesif	9
7	Pasir	Non-Kohesif	12
8	Pasir	Non-Kohesif	15
9	Pasir	Non-Kohesif	11
10	Pasir	Non-Kohesif	7
11	Pasir	Non-Kohesif	11
12	Pasir	Non-Kohesif	15
13	Pasir	Non-Kohesif	13
14	Pasir	Non-Kohesif	11
15	Pasir	Non-Kohesif	16,5
16	Pasir	Non-Kohesif	22
17	Pasir	Non-Kohesif	15,5
18	Pasir	Non-Kohesif	9
19	Pasir	Non-Kohesif	12,5
20	Pasir	Non-Kohesif	16

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	Karakteristik Tanah	NSPT
21	Pasir	Non-Kohesif	21,5
22	Pasir	Non-Kohesif	27
23	Pasir	Non-Kohesif	43,5
24	Pasir	Non-Kohesif	60
25	Pasir	Non-Kohesif	60
26	Pasir	Non-Kohesif	60
27	Pasir	Non-Kohesif	60
28	Pasir	Non-Kohesif	60
29	Pasir	Non-Kohesif	60
30	Pasir	Non-Kohesif	60

Berdasarkan Gambar 2 dan Gambar 3, maka nilai N-SPT 60 (tanah keras) untuk *abutment* 1 berada di kedalaman 22 m dari elevasi tanah eksisting dan *abutment* 2 berada di kedalaman 24 m dari elevasi eksisting, untuk *abutment* 1 jarak antara tanah eksisting sampai *Bottom of Footing* (BOF) 3 m sehingga sisa panjang tiang sebesar 19 m, untuk *abutment* 2 jarak antara tanah eksisting sampai *Bottom of Footing* (BOF) 7 m, sehingga sisa panjang tiang sebesar 17 m.

2.4. Konfigurasi Tiang Desain Eksisting

Denah pengeboran tiang desain eksisting Jembatan STA. 43+425 Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3, fondasi tiang yang digunakan menggunakan diameter sebesar 0,8 m. Berjumlah 68 tiang untuk masing-masing *abutment* dengan jarak antara tiang sebesar 2,45 m. Adapun denah dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Denah konfigurasi tiang desain eksisting *abutment* Jembatan STA. 43+425 Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3

2.5. Daya Dukung Tiang

Untuk menghitung kapasitas daya dukung *ultimate* tiang menggunakan data *bore log*.

$$Q_p = A_p \times f_p \quad (1)$$

Dengan Q_p adalah tahanan ujung *ultimate* tiang, A_p adalah luas penampang tiang, f_p adalah tahanan ujung satuan tiang.

$$Q_s = A_s \times f_s \quad (2)$$

Dengan Q_s adalah tahanan gesek dinding tiang, A_s adalah luas selimut tiang, f_s adalah tahanan gesek satuan tiang.

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (3)$$

Dengan Q_u adalah kapasitas daya dukung *ultimate* tiang, yaitu jumlah dari tahanan ujung *ultimate* dan tahanan gesek dinding tiang antara sisi tiang dan tanah disekitarnya.

2.5. Daya Dukung Tiang Tanah Kohesif

Dilakukan perhitungan perlapisan tanah menggunakan metode Reese & Wright (1977). Rumus yang digunakan dalam perhitungan daya dukung ujung tiang untuk jenis tanah kohesif yaitu:

$$Q_p = q_p \times A_p \quad (4)$$

Dengan Q_p adalah daya dukung ujung tiang (ton), A_p adalah luas penampang tiang (m^2), dan q_p adalah tahanan ujung per satuan luas (ton/m^2).

$$A_p = \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \quad (5)$$

Dengan D adalah diameter tiang (m).

$$q_p = 9 \times c_u \quad (6)$$

Dengan c_u adalah kekuatan geser tak terdrainase rata-rata.

$$c_u = \frac{2}{3} \times N_{SPT} \quad (7)$$

Rumus yang digunakan dalam perhitungan daya dukung selimut tiang untuk jenis tanah kohesif yaitu:

$$Q_s = f \times l \times A_s \quad (8)$$

Dengan Q_s adalah daya dukung selimut tiang (ton), f adalah tahanan satuan selimut tiang (ton/m^2), l adalah panjang per-lapisan tanah (m), A_s adalah keliling tiang (m).

$$f = \alpha \times c_u \quad (9)$$

Dengan α adalah faktor adhesi digunakan sebesar 0,55.

$$A_s = \pi \times D \quad (10)$$

2.6. Daya Dukung Tiang Tanah Non-Kohesif

Dilakukan perhitungan perlapisan tanah menggunakan metode Reese & Wright (1977).

Rumus yang digunakan dalam perhitungan daya dukung ujung tiang untuk jenis tanah non-kohefif yaitu:

$$Q_p = q_p \times A_p \quad (11)$$

Dengan Q_p adalah daya dukung ujung tiang (ton), A_p adalah luas penampang tiang (m^2), dan q_p adalah tahanan ujung per satuan luas (ton/m^2).

Untuk $\bar{N} \leq 60$ maka,

$$q_p = 7 \times \bar{N} \quad (12)$$

Untuk $\bar{N} > 60$ maka, digunakan q_p sebesar 400 ton/m^2 .

Dengan \bar{N} adalah nilai N_{SPT} rata-rata.

$$\bar{N} = \frac{N_1 + N_2}{2} \quad (13)$$

Rumus yang digunakan dalam perhitungan daya dukung selimut tiang untuk jenis tanah non-kohefif yaitu:

$$Q_s = f \times l \times A_s \quad (14)$$

Dengan Q_s adalah daya dukung selimut tiang (ton), f adalah tahanan satuan selimut tiang (ton/m^2), l adalah panjang per-lapisan tanah (m), A_s adalah keliling tiang (m).

Untuk $\bar{N} < 53$ maka,

$$f = 0,32 \times \bar{N} \quad (15)$$

Untuk $\bar{N} > 53$ maka,

$$f = \frac{\bar{N}}{53} \times 0,32 \times \bar{N} \times A_s \quad (16)$$

2.7. Daya Dukung Izin Tiang

Untuk mendapatkan daya dukung izin tiang, nilai dari daya dukung ultimit dibagi dengan faktor keamanan dimana kondisi daya dukung izin tiang tidak boleh melebihi hasil dari daya dukung *ultimate* tiang.

$$Q_a = \frac{Q_u}{SF} \quad (17)$$

Dengan Q_a adalah daya dukung izin tiang (ton), Q_u adalah daya dukung *ultimate* tiang (ton), SF adalah faktor keamanan minimum 2,5 untuk fondasi dalam. Jadi, digunakan sebesar 2,5 [7].

2.8. Efisiensi Kelompok Tiang

Daya dukung tiang tunggal dapat menurun setelah dikelompokkan. Faktor yang

menyebabkan penurunan daya dukung tiang-tiang tersebut adalah jarak antar tiang yang terlalu rapat sehingga daya dukung tiang-tiang tersebut dapat berkurang [8]. Rumus untuk mencari nilai efisiensi kelompok tiang sebagai berikut:

$$\eta = 1 - \theta \frac{(m-1) \times n + (n-1) \times m}{90 \times m \times n} \quad (18)$$

Dengan η adalah efisiensi kelompok tiang, m adalah jumlah tiang pada deretan baris, θ adalah sudut pengaruh interaksi antar tiang, n adalah jumlah tiang pada deretan kolom.

$$\theta = \arctan \frac{D}{s} \quad (19)$$

Dengan D adalah diameter tiang, s adalah jarak antara tiang.

2.9. Daya Dukung Kelompok Tiang

Dari hasil perhitungan daya dukung izin tiang (Q_a) dan nilai efisiensi kelompok tiang (η) maka dapat diperoleh kapasitas *ultimate* kelompok tiang (Q_g).

$$Q_g = \eta \times \sum Q_a \quad (20)$$

Dengan Q_g adalah daya dukung kelompok tiang (ton), η adalah efisiensi kelompok tiang, \sum adalah jumlah tiang, Q_a adalah daya dukung izin tiang.

2.10. Harga Satuan Tiang

Harga satuan tiang bor beton diameter 0,8 m dan 1,2 m berdasarkan *bill of quantities* Pekerjaan Pembangunan Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3.

Tabel. 5 Harga satuan tiang bor desain eksisting dan desain optimasi Pekerjaan Pembangunan Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3

Item	Satuan	Harga Satuan (Rp)
Tiang Bor Beton <i>Cast-in-Place</i> D = 80 cm	m	3.552.406,00
Tiang Bor Beton <i>Cast-in-Place</i> D = 120 cm	m	6.936.604,00

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa desain optimasi diameter tiang bor dari 0,8 m menjadi 1,2 m merupakan

solusi yang lebih efektif baik dari segi teknis maupun ekonomis. Kapasitas daya dukung meningkat signifikan, jumlah tiang dapat dikurangi hampir 50%, dan biaya konstruksi berhasil ditekan tanpa mengurangi tingkat keamanan struktur.

3.1. Perhitungan Daya Dukung Tiang Tunggal

Daya dukung tiang adalah tahanan ujung (Q_p) dan tahanan selimut (Q_s). Hasil penjumlahan tersebut kemudian menjadi nilai daya dukung *ultimate*. Hasil analisis daya dukung disajikan pada Tabel 6 dan Tabel 7.

Tabel 6. Rekapitulasi daya dukung tiang tunggal desain eksisting diameter 0,8 m

Nilai	<i>Abutment 1</i>	<i>Abutment 2</i>
Q_p (ton)	156,50	181,99
Q_s (ton)	311,14	278,19
Q_u (ton)	467,63	460,18
Q_a (ton)	187,05	184,07

Tabel 7. Rekapitulasi daya dukung tiang tunggal desain optimasi diameter 1,2 m

Nilai	<i>Abutment 1</i>	<i>Abutment 2</i>
Q_p (ton)	352,12	409,49
Q_s (ton)	466,70	417,28
Q_u (ton)	818,82	826,77
Q_a (ton)	327,53	330,71

Hasil analisis daya dukung tiang tunggal *ultimate* (Q_u) harus dibagi dengan faktor keamanan, nilai faktor keamanan sebesar 2,5. Hasil pembagian tersebut menjadi nilai daya dukung tiang tunggal yang diizinkan (Q_a). Analisis daya dukung dihitung hingga kedalaman (L) 22 m untuk *abutment 1* dan kedalaman (L) 25 m untuk *abutment 2*. Dengan menggunakan metode Reese & Wright untuk tiang desain eksisting *abutment 1* diperoleh daya dukung izin sebesar 187,05 ton dan tiang desain eksisting *abutment 2* diperoleh daya dukung izin sebesar 181,99 ton. Untuk tiang hasil desain optimasi *abutment 1* diperoleh daya dukung izin sebesar 327,53 ton dan tiang hasil desain

optimasi *abutment 2* diperoleh daya dukung sebesar 330,71 ton.

3.2. Perhitungan Daya Dukung Kelompok Tiang

Untuk menghitung nilai kapasitas dukung kelompok tiang, ada beberapa hal yang harus diperhatikan terlebih dahulu, yaitu jumlah tiang dalam satu kelompok, jarak tiang, susunan tiang dan efisiensi kelompok tiang [9]. Metode efisiensi yang digunakan dalam analisis ini yaitu, Persamaan Converse-Laberre. Tabel 8 dan 9 merupakan hasil analisis efisiensi tiang kelompok.

Tabel 8. Perhitungan efisiensi kelompok tiang desain eksisting diameter 0,8 m

Nilai	<i>Abutment 1</i>	<i>Abutment 2</i>
s (m)	2,45	2,45
m	17	17
n	4	4
η	0,994	0,994

Tabel 9. Perhitungan efisiensi kelompok tiang desain optimasi diameter 1,2 m

Nilai	<i>Abutment 1</i>	<i>Abutment 2</i>
s (m)	3,5	3,5
m	11	11
n	3	3
η	0,994	0,994

Berdasarkan Tabel 8 dan Tabel 9, setelah nilai efisiensi diperoleh, kemudian daya dukung yang diizinkan untuk tiang kelompok dihitung. Tabel 10 dan 11 merupakan hasil analisis daya dukung tiang kelompok.

Tabel 10. Perhitungan daya dukung tiang kelompok desain eksisting diameter 0,8 m

Nilai	<i>Abutment 1</i>	<i>Abutment 2</i>
Q_a (ton)	187,05	184,07
η	0,994	0,994
Σ (buah)	68	68
Q_g (ton)	12644,21	12442,71

Tabel 11. Perhitungan daya dukung tiang kelompok desain optimasi diameter 1,2 m

Nilai	Abutment 1	Abutment 2
Q_a (ton)	327,53	330,71
η	0,994	0,994
Σ (buah)	32	32
Q_g (ton)	10420,34	10521,44

Dari hasil perhitungan daya dukung tiang desain eksisting yang diambil pada diameter 0,8 m dengan jumlah tiang 68 diperoleh nilai daya dukung kelompok desain eksisting sebesar 12644,21 ton untuk *abutment* 1 dan 12442,71 ton untuk *abutment* 2. Daya dukung tiang desain optimasi yang diambil pada diameter 1,2 m dengan jumlah tiang 32 diperoleh nilai daya dukung kelompok desain optimasi sebesar 10420,34 ton untuk *abutment* 1 dan 10521,44 ton untuk *abutment* 2.

3.3. Kontrol Beban Aksial

Daya dukung aksial ini kemudian dibandingkan dengan beban struktur atas, jika nilai daya dukung yang direncanakan lebih besar dari perencanaan, maka perencanaan sudah memadai [10]. Pengendalian beban aksial dilakukan dengan tujuan mengetahui beban maksimum yang dapat terjadi pada tiang. Berikut adalah hasil analisis beban maksimum pada tiang.

Untuk *abutment* 1,

$$F_z = 10244,28 \text{ ton}$$

Untuk *abutment* 2,

$$F_z = 9509,19 \text{ ton}$$

Tabel 12. Kontrol beban aksial tiang desain eksisting diameter 0,8 m

Nilai	Abutment 1	Abutment 2
F_z (ton)	10244,28	9509,19
Q_g (ton)	12644,21	12442,71
$Q_g > F_z$	OK	OK

Tabel 13. Kontrol beban aksial tiang desain optimasi diameter 1,2 m

Nilai	Abutment 1	Abutment 2
F_z (ton)	10244,28	9509,19
Q_g (ton)	10420,34	10521,44
$Q_g > F_z$	OK	OK

Jika hasil perbandingan nilai F_z dan Q_g memenuhi persyaratan, maka tiang dinyatakan stabil, artinya mampu menahan beban maksimum yang terjadi.

3.4 Estimasi Biaya Tiang

Berikut adalah biaya yang diperlukan untuk fondasi tiang bor beton Jembatan STA. 43+425 Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3 desain diameter 0,8 m eksisting dan desain optimasi diameter 1,2 m.

Tabel 14. Estimasi biaya fondasi tiang bor beton desain eksisting diameter 0,8 m

Nilai	Abutment 1	Abutment 2
Kuantitas (m)	1292	1156
Harga Satuan (Rp)	3.552.406	3.552.406
Total Harga (Rp)	4.550.948.552	4.071.901.336

Tabel 15. Estimasi biaya fondasi tiang bor beton desain optimasi diameter 1,2 m

Nilai	Abutment 1	Abutment 2
Kuantitas (m)	608	544
Harga Satuan (Rp)	6.936.604	6.936.604
Total Harga (Rp)	4.217.455.232	3.773.512.576

3.5 Perbandingan Estimasi Biaya

Berikut adalah Tabel 16 perbandingan deviasi biaya antara fondasi tiang bor desain eksisting diameter 0,8 m dengan biaya fondasi tiang bor desain optimasi diameter 1,2 m karena perubahan dimensi dan pengurangan jumlah tiang.

Tabel 16. Perbandingan estimasi biaya fondasi tiang bor beton desain eksisting diameter 0,8 m dengan desain optimasi diameter 1,2 m

Biaya Desain Eksisting	Biaya Desain Optimasi	Deviasi Biaya
------------------------	-----------------------	---------------

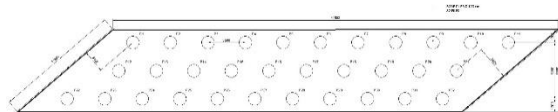
(Rp)

8.622.849.888	7.990.967.808	631.882.080
---------------	---------------	-------------

Berdasarkan hasil perhitungan perbandingan tersebut, didapatkan hasil jika menggunakan perubahan dimensi dan pengurangan jumlah tiang, biaya tiang desain sebesar Rp8.622.849.888,00 dengan biaya tiang hasil optimasi sebesar Rp7.990.967.808,00. sehingga terdapat deviasi pengurangan biaya sebesar Rp631.882.080,00.

3.6 Konfigurasi Tiang Desain Optimasi

Denah pengeboran tiang desain optimasi Jembatan STA. 43+425 Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3, fondasi tiang yang digunakan menggunakan diameter sebesar 1,2 m. Berjumlah 32 tiang untuk masing-masing *abutment* dengan jarak antara tiang sebesar 3,50 m. Adapun denah dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Denah konfigurasi tiang desain optimasi *abutment* Jembatan STA. 43+425 Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3

4. KESIMPULAN

1. Perubahan diameter tiang dari 0,8 m menjadi 1,2 m meningkatkan kapasitas daya dukung tiang tunggal secara signifikan. Pada *abutment 1*, daya dukung izin meningkat dari 187,05 ton menjadi 327,53 ton, sedangkan pada *abutment 2* meningkat dari 184,07 ton menjadi 330,71 ton.
2. Jumlah tiang berhasil dikurangi tanpa menurunkan stabilitas struktur. Konfigurasi awal terdiri dari 68 tiang per *abutment*, sedangkan desain hasil optimasi hanya memerlukan 32 tiang per *abutment*, dengan nilai efisiensi kelompok yang tetap memenuhi persyaratan stabilitas.
3. Daya dukung kelompok tiang hasil optimasi tetap lebih besar dari beban aksial maksimum yang bekerja. Beban terbesar sebesar 10.244,28 ton (*abutment 1*) dan 9.509,19 ton (*abutment 2*) masih berada di bawah kapasitas tiang kelompok hasil

optimasi (10.420,34 ton dan 10.521,44 ton), sehingga fondasi dinyatakan aman.

4. Optimasi memberikan penghematan biaya konstruksi yang signifikan. Total biaya fondasi sebelum optimasi sebesar Rp8.622.849.888, sedangkan setelah optimasi menjadi Rp7.990.967.808, menghasilkan penghematan sebesar Rp631.882.080.
5. Secara keseluruhan, optimasi diameter tiang dan pengurangan jumlah tiang memberikan sistem fondasi yang lebih efektif, aman, serta ekonomis untuk Jembatan STA. 43+425 pada Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pasaribu B., Tanjung D., Vebi Yuriza F., 2022, Analisa Daya Dukung Pondasi Alam Pada Proyek Pembangunan Jembatan Gantung Kabupaten Toba Samosir Provinsi Sumatera Utara, *JURNAL TEKNIK SIPIL (JTSIP)*, 1(2), pp.143.
- [2] Pratama F., 2022. *Peninjauan Ulang Struktur Bawah Meliputi Bored Pile dan Pilar Pada Proyek Pembangunan Paket Lot 3 Jembatan Kretek 2 Bantul*. A.Md.T. Semarang: Universitas Diponegoro.
- [3] Dachi Wati E., Indah Sari K., 2024, Analisis Daya Dukung Pondasi Bored Pile Pada Proyek Pembangunan Gedung Sekolah Al-Rahmat di Kota Medan (Studi Kasus), *JURNAL TEKNIK SIPIL (JTSIP)*, 3(1), pp.75.
- [4] Rafi' M., Rachman N., Pertiwi Dika K., Marasabessy Muhammad I., 2025. Evaluasi Kapasitas Aksial Tekan Tiang Bor Berdasarkan Data SPT dan SLT : Studi Kasus Gedung Rumah Sakit Klaten. In: Universitas Islam Indonesia, *Proceeding Civil Engineering Research Forum*. Yogyakarta, Indonesia 1 July 2025. Universitas Islam Indonesia: Yogyakarta.
- [5] Melisa, Junaidi, 2020, Kapasitas Dukung Aksial Pondasi Bored Pile Menurut O'Neil & Reese dan Coyle Castello (Studi Kasus : Fly Over Simpang SKA), *JURNAL INOVTEK SERI TEKNIK SIPIL DAN APLIKASI (TEKLA)*, 2(1), pp.33.
- [6] Fajri Nurul Hakim M., Abdul Hadi M., 2023, Analisis Daya Dukung dan Penurunan Pondasi Berdasarkan Data N-SPT Diverifikasi dengan Nilai PDA dan CAPWAP. In: Universitas Islam Indonesia, *Proceeding Civil Engineer Research Forum*. Yogyakarta, Indonesia 1 July 2023. Universitas Indonesia: Yogyakarta.
- [7] Badan Standardisasi Nasional, 2017. SNI 8460:2017 – Persyaratan Perancangan Geoteknik. Jakarta: BSN.
- [8] Yelvi, Sebastian Gerraldo T., Akbar Hakim D., 2023, Analysis of Foundation Bearing Capacity Using Reese & Wright (1977) and Skempton (1966) Methods, *Jurnal POLI-TEKNOLOGI*, 22(2), pp.49.
- [9] Sapriyadi W., Priadi E., Faisal A., 2018, Kajian Daya Dukung Tiang Pancang di Tanah Lunak dengan Menggunakan Ensoft, *JeLAST: Jurnal Teknik Kelautan, PWK, Sipil, dan Tambang*, 5(1), pp.3.
- [10] Gevin Ardi M., Yusa M., Nugroho S. A., 2017, Analisis Perilaku Tiang Tunggal Akibat Beban Aksial Tekan dengan Metode Empirik dan Elemen Hingga, *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau*, 4(2), pp.1.