

STUDI PERBANDINGAN ANALISIS METODE EMPIRIS DAN NUMERIK FONDASI TIANG BOR PADA GEDUNG 5 LANTAI YOGYAKARTA

Dwi Oktavian Derian Shakti^{1*}, R. A. Mariyana², Dyah Ayu Rahmawati Cupasindy³

Mahasiswa Manajemen Rekayasa Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang¹, Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang², Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang³

dwioktavian@gmail.com¹, raden.ajeng@polinema.ac.id², dyahayu.rahmawati@polinema.ac.id³

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis kapasitas daya dukung dan penurunan fondasi tiang bor berdiameter 50 cm dengan panjang 12 m pada gedung kantor 5 lantai di Kota Yogyakarta. Kondisi tanah dominan pasir dengan muka air tanah dangkal 3,5 m dan termasuk zona gempa tinggi (SNI 1726:2019). Analisis beban struktur atas menggunakan ETABS sesuai SNI 1726:2019 dan SNI 1727:2020. Evaluasi fondasi dilakukan melalui dua pendekatan: metode empiris berbasis Standard Penetration Test (SPT) menggunakan rumus Meyerhof (1976), serta metode numerik Finite Element Method (FEM) menggunakan PLAXIS 2D. Fondasi direncanakan 440 titik tiang bor konfigurasi 4 tiang per pile cap (3,5 m × 3,5 m × 0,8 m). Hasil ETABS menghasilkan gaya aksial maksimum 5.052,79 kN. Metode Meyerhof menghasilkan kapasitas daya dukung izin kelompok tiang 5.929,20 kN, safety factor 3,52 dan penurunan 1,45 cm. Analisis PLAXIS 2D menghasilkan safety factor 3,22 dengan penurunan 10,62 cm. Seluruh hasil memenuhi SNI 8460:2017. Metode pelaksanaan yang direkomendasikan adalah kombinasi *temporary casing* dan *wet drilling* dengan bentonit. Total RAB pekerjaan fondasi adalah Rp18.226.218.737,00 (termasuk PPN 11%).

Kata kunci: Fondasi Tiang Bor, Metode Empiris, PLAXIS 2D, ETABS, Daya Dukung.

ABSTRACT

This study analyzes the bearing capacity and settlement of a bored pile foundation with a diameter of 50 cm and a length of 12 m for a five-story office building in Yogyakarta City. The site is characterized by predominantly sandy soil with a shallow groundwater table at a depth of 3.5 m and is located in a high seismic hazard zone in accordance with SNI 1726:2019. The superstructure loads were analyzed using ETABS based on SNI 1726:2019 and SNI 1727:2020. The foundation was evaluated using two approaches: the empirical method based on Standard Penetration Test (SPT) data employing the Meyerhof (1976) method, and the numerical method using the Finite Element Method (FEM) implemented in PLAXIS 2D. The foundation system consists of 440 bored piles arranged in groups of four piles per pile cap measuring 3.5 m × 3.5 m × 0.8 m. The ETABS analysis produced a maximum axial load of 5,052.79 kN. The Meyerhof method yielded an allowable group bearing capacity of 5,929.20 kN, an actual safety factor of 3.52, and an elastic settlement of 1.45 cm. The PLAXIS 2D analysis resulted in a safety factor of 3.22 and a settlement of 10.62 cm. All results satisfy the requirements of SNI 8460:2017, indicating that the foundation design is safe. The recommended construction method is a combination of temporary casing and wet drilling using bentonite slurry. The total estimated construction cost of the foundation is IDR 18,226,218,737.00, including 11% Value Added Tax (VAT).

Keywords: Bored Pile Foundation; Empirical Method; PLAXIS 2D; ETABS; Bearing Capacity.

1. PENDAHULUAN

Fondasi tiang bor (*bored pile*) merupakan solusi fondasi dalam yang banyak diterapkan pada bangunan bertingkat di wilayah rawan gempa dengan kondisi tanah pasir dan muka air tanah dangkal. Fondasi ini mampu menyalurkan beban struktur ke lapisan tanah yang lebih dalam melalui mekanisme tahanan ujung dan tahanan selimut tiang, sekaligus meminimalkan getaran dan kebisingan selama

pelaksanaan [1][2]. Kota Yogyakarta sebagai zona gempa tinggi menuntut perencanaan fondasi yang tidak hanya memikul beban gravitasi, tetapi juga mampu menahan gaya lateral akibat beban seismik.

Dua pendekatan analisis yang lazim digunakan adalah metode empiris berbasis *Standard Penetration Test* (SPT) dan metode numerik berbasis *Finite Element Method* (FEM). Metode empiris relatif sederhana, namun terbatas dalam

merepresentasikan perilaku tanah berlapis secara komprehensif. Sebaliknya, FEM melalui PLAXIS 2D mampu mensimulasikan interaksi tanah-fondasi, distribusi tegangan, dan tahapan konstruksi secara lebih rinci [3]. Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa perbedaan nilai penurunan antar metode cukup signifikan, meski keduanya umumnya memenuhi SNI 8460:2017 [4], [5], [6]

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis beban struktur atas menggunakan ETABS, menghitung kapasitas daya dukung, penurunan, dan *safety factor* fondasi tiang bor menggunakan metode empiris Meyerhof (1976), menganalisis *safety factor* dan penurunan menggunakan PLAXIS 2D, membandingkan hasil kedua metode, menentukan metode pelaksanaan, serta menghitung Rencana Anggaran Biaya (RAB) pekerjaan fondasi.

2. METODE

Prosedur penelitian diawali dengan pengumpulan data *Bore Log* (BH-02) dan pemodelan struktur atas pada ETABS untuk mengekstraksi reaksi perletakan maksimum (nilai F_z). Kemudian analisis geoteknik dilakukan secara komparatif antara perhitungan manual dan simulasi dengan program PLAXIS 2D.

Pembebanan Struktur Atas

Analisis struktur atas dilakukan untuk memperoleh beban yang akan diteruskan ke fondasi. Pembebanan meliputi beban mati, beban hidup, beban angin, dan beban gempa, yang kemudian dikombinasikan menggunakan metode *Allowable Stress Design* (ASD) dan *Load and Resistance Factor Design* (LRFD) sesuai ketentuan SNI 1727:2020 dan SNI 1726:2019 sebagai dasar perencanaan fondasi.

Daya Dukung Tiang Tunggal (Metode Mayerhoff, 1976)

Perencanaan fondasi tiang tunggal bertujuan untuk memastikan bahwa tiang mampu menahan beban yang bekerja tanpa mengalami kegagalan baik dari segi kekuatan maupun penurunan yang berlebihan. Oleh karena itu, diperlukan perhitungan daya dukung fondasi yang didasarkan pada kondisi tanah di lokasi proyek.

a. Daya Dukung Ujung Tiang, Q_p

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

1. Tanah Kohesif (*Clay*)

$$q_p = 9 \cdot C_u \quad (2)$$

2. Tanah Non Kohesif (*Sand*)

$$q_p = 40 \cdot N_{60} \cdot L/D \leq 400 \cdot N_{60} \quad (3)$$

b. Daya Dukung Selimut Tiang, Q_s

$$Q_s = \sum p \cdot \Delta L \cdot f_{av} \quad (4)$$

1. Tanah Kohesif (*Clay*)

$$f_{av} = \alpha \cdot C_u \quad (5)$$

2. Tanah Non Kohesif (*Sand*)

$$f_{av} = 0,01 \text{ Pa} \cdot N_{60}, \text{ low-displacement} \quad (6)$$

Keterangan:

Q_p = daya dukung ujung tiang (kN)

q_p = tahanan ujung per satuan luas tiang (kN/m²)

A_p = luas penampang ujung tiang (m²)

N_{60} = nilai SPT rata-rata disekitar ujung tiang

Q_s = daya dukung selimut tiang

p = keliling tiang (m)

f_{av} = friksi tiang rata-rata

ΔL = panjang kedalaman tiang (m)

D = diameter (m)

$C_u = S_u$ = kohesi *undrained* (kN/m²)

P_a = 100 kN/m²

α = faktor adhesi

Efisiensi Kelompok Tiang

Efisiensi kelompok tiang dihitung menggunakan formula Converse-Labarre:

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

Dengan

$$\theta = \tan^{-1}(D/d) \quad (8)$$

Keterangan:

E_g = efisiensi kelompok tiang (%)

n_1 = jumlah baris tiang arah x

n_2 = jumlah baris tiang arah y

θ = sudut arc tg yang dinyatakan dalam derajat

d = jarak antar pusat tiang (m)

D = diameter tiang (m)

Daya Dukung Kelompok Tiang

Daya dukung ultimit kelompok tiang dan daya dukung izin dapat dihitung sebagai berikut:

$$Q_{g(u)} = E_g \times n \times Q_u \quad (9)$$

$$Q_{g(all)} = \frac{Q_{g(u)}}{SF} \quad (10)$$

Keterangan:

$Q_{all(g)}$ = Daya dukung izin kelompok tiang (kN)

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

n = Jumlah tiang

Q_u = Daya dukung ultimit tiang tunggal (kN)

SF = Faktor Keamanan

Faktor Keamanan, SF

Selain digunakan sebagai faktor pembagi dalam menentukan kapasitas dukung, nilai faktor keamanan juga dapat

dievaluasi secara aktual untuk mengetahui tingkat keamanan fondasi terhadap beban kerja yang sebenarnya, dengan membandingkan kapasitas dukung ultimit kelompok tiang terhadap beban aksial yang bekerja.

$$SF_{aktual} = \frac{Q_{g(u)}}{F_z} \quad (11)$$

Keterangan:

SF_{aktual} = faktor keamanan aktual

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

F_z = beban aksial yang bekerja (kN)

Penurunan

Secara umum, penurunan fondasi kelompok tiang terdiri atas dua komponen utama, yaitu penurunan elastik (*immediate settlement*) dan penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*). Pada penelitian ini dikarenakan tanah pasir maka hanya meninjau penurunan elastik.

Penurunan Elastik Tiang Tunggal

Penurunan total tiang tunggal umumnya dihitung sebagai penjumlahan dari tiga komponen utama, yaitu:

$$S_e = S_{e(1)} + S_{e(2)} + S_{e(3)} \quad (12)$$

$$S_{e(1)} = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws}) \times L}{A_p \times E_p} \quad (13)$$

$$S_{e(2)} = \frac{Q_{wp} \cdot C_p}{D \cdot q_p} \quad (14)$$

$$S_{e(3)} = \left(\frac{Q_{ws}}{p \times L} \right) \times \left(\frac{D}{E_s} \right) \times (1 - \mu^2) \times I_{ws} \quad (15)$$

Keterangan:

S_e = penurunan elastik tiang tunggal (m)

$S_{e(1)}$ = penurunan yang terjadi sepanjang tiang (m)

$S_{e(2)}$ = penurunan tiang disebabkan oleh beban yang bekerja pada ujung tiang (m)

$S_{e(3)}$ = penurunan tiang disebabkan oleh beban yang bekerja sepanjang kulit/selutut tiang (m)

Penurunan Elastik Kelompok Tiang

Metode Mayerhoff, 1976

$$S_{g(e)} = \frac{0,96 \times q \times \sqrt{B_g} \times I}{N_{60}} \quad (16)$$

Keterangan:

$S_{g(e)}$ = penurunan elastik kelompok tiang (m)

B_g = lebar kelompok tiang (m)

Penurunan Izin

Penurunan fondasi dievaluasi terhadap batas penurunan izin sesuai dengan SNI 8640:2017. Untuk penurunan yang diizinkan dibatasi dengan persamaan rumus sebagai berikut:

$$S_{g(izin)} = 15 + \frac{B}{600} \quad (17)$$

Dengan syarat:

$$S_{g(e)} \leq S_{g(izin)} \quad (18)$$

Analisis Distribusi Gaya Aksial Tiang

Kondisi aktual di lapangan, beban yang bekerja pada fondasi tidak pernah benar-benar sentris. Hal ini disebabkan oleh adanya gaya lateral (F_x dan F_y) serta momen lentur (M_x dan M_y) yang bekerja bersamaan dengan gaya aksial (F_z). Oleh karena itu, distribusi beban pada kelompok dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$P_u = \frac{F_z}{n} \pm \frac{M_y \cdot x_i}{\sum x_i^2} \pm \frac{M_x \cdot y_i}{\sum y_i^2} \quad (19)$$

Dengan syarat:

$$P_{u,maks} \leq P_{izin} \quad (20)$$

P_u = beban aksial yang diterima tiang ke-i (kN)

F_z = gaya aksial total (kN)

n = jumlah tiang dalam kelompok

M_x = momen terhadap sumbu X (kN.m)

M_y = momen terhadap sumbu Y (kN.m)

x_i = jarak tiang ke-i terhadap pusat kelompok arah X (m)

y_i = jarak tiang ke-i terhadap pusat kelompok arah Y (m)

$\sum x_i^2$ = jumlah kuadrat jarak semua tiang arah X (m²)

$\sum y_i^2$ = jumlah kuadrat jarak semua tiang arah Y (m²)

P_{izin} = daya dukung ijin tiang tunggal (kN)

Analisis Distribusi Gaya Lateral

Gaya lateral yang bekerja pada pondasi tiang bersumber dari gaya geser yang disalurkan kolom lantai dasar, yaitu gaya geser arah X (F_x) dan gaya geser arah Y (F_y). Kedua komponen gaya geser tersebut didistribusikan secara merata ke seluruh tiang dalam kelompok.

$$h_{u mak} = \sqrt{h_{ux}^2 + h_{uy}^2} \quad (21)$$

$$H_n = y_0 \times k_h \times D \times [2\beta \times (e \times \beta + 1)] \quad (22)$$

$$h_{u mak} \leq \phi H_n \quad (23)$$

Keterangan:

h_{ux} = gaya lateral per tiang arah X (kN)

h_{uy} = gaya lateral per tiang arah Y (kN)

ϕH_n = kapasitas lateral ijin tiang (kN)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Struktur Atas (ETABS)

Analisis struktur atas dilakukan menggunakan ETABS untuk memperoleh gaya dalam yang digunakan sebagai dasar perencanaan fondasi dan penulangan. Kombinasi

pembebanan ASD (*Allowable Stress Design*) digunakan pada analisis geoteknik, meliputi perhitungan daya dukung, penurunan, dan stabilitas fondasi, sedangkan kombinasi LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) digunakan dalam perencanaan penulangan elemen struktur beton bertulang, seperti bored pile dan pile cap. Rekapitulasi gaya dalam hasil analisis disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil Gaya Dalam pada Kolom Kritis

Gaya Dalam	Satuan	Kombinasi Beban	
		ASD	LRFD
Fz	kN	5052.79	6008.05
Mx	kN.m	120.49	241.84
My	kN.m	-30.77	104.82
Fx	kN	-17.11	248.14
Fy	kN	-25.40	603.65

Sumber: Hasil Analisis ETABS

3.2 Hasil Analisis Metode Empiris

a. Daya Dukung Tiang Tunggal Metode Mayerhoff 1976

Berikut disajikan contoh perhitungan kapasitas daya dukung tiang tunggal dengan diameter 0,5 meter pada kedalaman 12 meter menggunakan metode Meyerhof (1976).

1) Kapasitas Daya Dukung Ujung Tiang, Q_p

Ujung tiang berada pada tanah non kohesif (sand)

$$q_p = 40 \times N_{60} \times L/D \leq 400N_{60}$$

$$\begin{aligned} q_{p1} &= 40 \times N_{60} \times L/D \\ &= 40 \times 59 \times 15/0,5 \\ &= 56.640 \text{ kN/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{p2} &= 400 \times N_{60} \\ &= 400 \times 59 \\ &= 23.600 \text{ kN/m}^3 \end{aligned}$$

Jadi, nilai q_p yang dipakai yaitu 23.600 kN/m³

Maka diperoleh nilai Q_p sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Q_p &= q_p \times A_p \\ &= 23.600 \times 0,196 \\ &= 4633,85 \text{ kN} \end{aligned}$$

2) Kapasitas Daya Dukung Selimut Tiang, Q_s

Nilai Q_s pada kedalaman tiang 12 m ada beberapa lapisan tanah yaitu tanah kohefif (*clay*) pada lapisan tanah 1 dan tanah non kohesif (*sand*) pada lapisan tanah 2 sampai lapisan tanah 4.

1. Tanah Kohesif (*clay*)

- Lapisan Tanah 1

$$\begin{aligned} Q_{s1} &= \Sigma p \times \Delta L \times f_{av} \\ &= 1,571 \times 2 \times 41,12 \\ &= 129,182 \text{ kN} \end{aligned}$$

Sehingga nilai Q_s clay yaitu

$$Q_{s \text{ clay}} = Q_{s1}$$

$$= 129,182 \text{ kN}$$

2. Tanah Non Kohesif (*sand*)

- Lapisan Tanah 2

$$\begin{aligned} Q_{s2} &= p \times \Delta L \times f_{av} \\ &= 1,571 \times 3 \times 40,00 \\ &= 188,496 \text{ kN} \end{aligned}$$

• Lapisan Tanah 3

$$\begin{aligned} Q_{s3} &= p \times \Delta L \times f_{av} \\ &= 1,571 \times 4 \times 57,00 \\ &= 358,142 \text{ kN} \end{aligned}$$

• Lapisan Tanah 4

$$\begin{aligned} Q_{s4} &= p \times \Delta L \times f_{av} \\ &= 1,571 \times 3 \times 60,00 \\ &= 282,743 \text{ kN} \end{aligned}$$

Nilai $Q_{s \text{ sand}}$ yaitu:

$$\begin{aligned} Q_{s \text{ sand}} &= Q_{s2} + Q_{s3} + Q_{s4} \\ &= 188,496 + 358,142 + 282,743 \\ &= 829,38 \text{ kN} \end{aligned}$$

Sehingga Nilai $Q_{s \text{ total}}$ yaitu:

$$\begin{aligned} Q_{s \text{ total}} &= Q_{s \text{ clay}} + Q_{s \text{ sand}} \\ &= 129,182 + 829,38 \\ &= 958,563 \text{ kN} \end{aligned}$$

3) Kapasitas Daya Dukung Ultimit, Q_u

$$\begin{aligned} Q_u &= Q_p + Q_s \\ &= 4633,849 + 958,563 \\ &= 5592,41 \text{ kN} \end{aligned}$$

4) Kapasitas Daya Dukung Izin, Q_{all}

$$\begin{aligned} Q_{all} &= Q_u \div SF \\ &= 4829,814 \div 3 \\ &= 1864,14 \text{ kN} \end{aligned}$$

Berikut ini merupakan rekapitulasi hasil perhitungan kapasitas daya dukung tiang tunggal Metode Meyerhof

Tabel 2. Rekapitulasi Daya Dukung Tiang Tunggal Metode Mayerhof 1976 Kedalaman 12 Meter dan 15 Meter

L (m)	D (m)	Q_p (kN)	Q_s (kN)	Q_u (kN)	Q_{all} (kN)
12	0,4	2965,66	766,85	3732,51	1244,17
	0,5	4633,85	958,56	5592,41	1864,14
	0,6	6672,74	1150,28	7823,02	2607,67
	0,8	11661,59	1533,70	13195,29	4398,43
	1,0	16964,60	1917,13	18881,73	6293,91

15	0,4	3015,93	993,04	4008,97	1336,32
	0,5	4712,39	1241,31	5953,70	1984,57
	0,6	6785,84	1489,57	8275,41	2758,47
	0,8	12063,72	1986,09	14049,81	4683,27
	1,0	18849,56	2482,61	21332,17	7110,72

Sumber: Hasil Perhitungan

b. Daya Dukung Kelompok Tiang

Kapasitas daya dukung kelompok tiang dihitung berdasarkan kapasitas daya dukung tiang tunggal yang telah diperoleh sebelumnya dengan mempertimbangkan efisiensi kelompok tiang

1) Jumlah Tiang

$$n = Q_v \div Q_{all}$$

$$= 5.052,79 \div 1864,14$$

$$\approx 4 \text{ buah tiang}$$

Sehingga didapatkan:

$$n_1 = 2 \quad (\text{arah } x)$$

$$n_2 = 2 \quad (\text{arah } y)$$

2) Jarak Antar Tiang, d

$$d = 3D$$

$$= 3 \times 0,50$$

$$= 1,50 \text{ m}$$

3) Jarak Antar Tepi Tiang Arah X, Lg

$$L_g = [(n_1 - 1) \times d] + \left[2 \times \frac{D}{2}\right]$$

$$= [(2 - 1) \times 1,50] + \left[2 \times \frac{0,5}{2}\right]$$

$$= 2 \text{ m}$$

4) Jarak Antar Tepi Tiang Arah Y, Bg

$$B_g = [(n_2 - 1) \times d] + \left[2 \times \frac{D}{2}\right]$$

$$= [(2 - 1) \times 1,50] + \left[2 \times \frac{0,5}{2}\right]$$

$$= 2 \text{ m}$$

5) Jarak Overhang, s

Dalam praktik perencanaan, nilai *overhang* umumnya diambil sebesar 1,5 kali diameter sehingga diperoleh nilai jarak *overhang* sebesar 0,75 m

6) Efisiensi Kelompok Tiang, Eg

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

$$= 1 - \left[\frac{((2-1) \times 2) + ((2-1) \times 2)}{90 \times 2 \times 2} \right] \times 18,44$$

$$= 0,795$$

7) Kapasitas Daya Dukung Kelompok Tiang, $Q_{g(u)}$

$$Q_{g(u)} = E_g \times n \times Q_u$$

$$= 0,795 \times 4 \times 5592,412$$

$$= 17.787,61 \text{ kN}$$

8) Kapasitas Daya Dukung Izin Kelompok Tiang, $Q_{g(All)}$

$$Q_{g(All)} = \frac{Q_{g(u)}}{SF}$$

$$= \frac{17.787,61}{3}$$

$$= 5.929,20 \text{ kN}$$

Cek Syarat: $Q_{g(All)} \geq Q_v$

$$Q_{g(All)} = 5.929,20 \text{ kN} > Q_v = 5.052,79 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

Tabel 4. Rekapitulasi Daya Dukung Kelompok Tiang dengan Panjang 12 Meter dan 15 Meter

L (m)	D (m)	Lg (m)	Bg (m)	Eg (%)	$Q_{g(u)}$ (kN)	$Q_{g(All)}$ (kN)	CEK
12	0,40	1,60	1,60	1,60	11736,81	3912,27	NO
	0,50	2,00	2,00	2,00	12901,32	4300,44	NO
	0,60	2,40	2,40	0,60	15362,04	5120,68	OK
	0,80	3,20	3,20	0,80	14663,09	4887,70	NO
	1,00	1,60	1,60	1,60	21304,79	7101,60	OK
15	0,40	1,60	1,60	1,60	12800,34	4266,78	NO
	0,50	2,00	2,00	2,00	13842,85	4614,28	NO
	0,60	2,40	2,40	0,60	16043,62	5347,87	OK
	0,80	3,20	3,20	0,80	15321,80	5107,27	OK
	1,00	1,60	1,60	1,60	23212,83	7737,61	OK

Sumber: Hasil Perhitungan

c. Penurunan

1) Penurunan Elastik Tiang Tunggal, S_e

Perhitungan penurunan tiang tunggal dilakukan untuk seluruh variasi diameter dan kedalaman tiang yang telah direncanakan, dengan hasil rekapitulasi disajikan **Tabel 5.**

- Penurunan Elastik *Bored Pile*, $S_{e(1)}$

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

$$= \frac{(4186,72 + 0,5 \times 866,07) \times 12}{0,196 \times (2,35 \times 10^7)}$$

$$= 0,012 \text{ m}$$

$$S_{e(2)} = \frac{Q_{wp} \times C_p}{D \times q_p}$$

$$= \frac{4186,72 \times 0,10}{0,5 \times 23.600}$$

$$= 0,035 \text{ m}$$

$$S_{e(3)} = \left(\frac{Q_{ws}}{p \times L} \right) \times \left(\frac{D}{E_s} \right) \times (1 - \mu^2) \times I_{ws}$$

$$= \left(\frac{866,07}{1,57 \times 12} \right) \times \left(\frac{0,5}{60.000} \right) \times (1 - 0,25^2) \times 3,31$$

$$= 0,0013 \text{ m}$$

$$S_e = S_{e(1)} + S_{e(2)} + S_{e(3)}$$

$$= 0,012 + 0,035 + 0,0013$$

$$= 0,049 \text{ m}$$

$$= 4,88 \text{ cm}$$

Tabel 5. Rekapitulasi Penurunan Elastik Tiang Tunggal Metode Vesic (1977) pada Panjang Tiang 12 m dan 15 m

L	D	$S_{e(1)}$	$S_{e(2)}$	$S_{e(3)}$	S_e
---	---	------------	------------	------------	-------

(m)	(m)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
12	0,4	1,84	4,25	0,17	6,26
	0,5	1,20	3,55	0,13	4,88
	0,6	0,85	3,04	0,11	4,00
	0,8	0,48	2,41	0,08	2,97
	1,0	0,31	2,10	0,07	2,48
15	0,4	2,25	3,96	0,17	6,380
	0,5	1,47	3,33	0,14	4,941
	0,6	1,04	2,88	0,11	4,028
	0,8	0,60	2,26	0,08	2,939
	1,0	2,25	1,86	0,07	2,312

Sumber: Hasil Perhitungan

2) Penurunan Elastik Kelompok Tiang, $S_{g(e)}$

Contoh perhitungan penurunan elastik kelompok tiang ditampilkan pada fondasi tiang bor berdiameter 0,50 m, kedalaman 12 m. Penurunan Elastik Kelompok Tiang Metode Mayerhoff 1976

$$\begin{aligned}
 S_{g(e)} &= \frac{0,96 \times q \times \sqrt{B_g \cdot l}}{N_{60}} \\
 &= \frac{0,96 \times 1263,198 \times \sqrt{2,0 \times 0,50}}{59} \\
 &= 14,53 \text{ mm} \\
 &= 1,45 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

3) Penurunan Izin, $S_{g(all)}$

$$\begin{aligned}
 S_{g(all)} &= 15,00 + \frac{B}{600} \\
 &= 15,00 + \frac{7290}{600} \\
 &= 27,150 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

Cek syarat penurunan fondasi yang diizinkan $S_{g(e)} \leq S_{g(all)}$

$$S_{g(e)} = 1,45 \text{ cm} < S_{g(all)} = 27,15 \text{ cm} \rightarrow \text{OK}$$

Tabel 6. Rekapitulasi Penurunan Elastik Tiang Kelompok Metode Mayerhof (1976) Panjang Tiang 12 m dan 15 m

L (m)	D (m)	$S_{g(e)}$ (cm)	$S_{g(all)}$ (cm)	CEK
12	0,4	2,031	27,15	OK
	0,5	1,453	27,15	OK
	0,6	2,211	27,15	OK
	0,8	1,461	27,15	OK
	1,0	1,123	27,15	OK
15	0,4	2,031	27,15	OK
	0,5	1,453	27,15	OK
	0,6	2,211	27,15	OK
	0,8	1,461	27,15	OK
	1,0	1,123	27,15	OK

Sumber: Hasil Perhitungan

c. Pemilihan Dimensi Tiang

Berdasarkan hasil rekapitulasi analisis daya dukung dan penurunan pada seluruh, dipilih dimensi fondasi tiang bor dengan diameter $D = 0,5 \text{ m}$ dan panjang tiang $L = 12 \text{ m}$ sebagai dimensi yang paling efisien

d. Gaya Aksial yang Diterima Pile Akibat Beban ASD

Sebagai contoh, perhitungan gaya aksial pada tiang 1 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \frac{Fz}{n} + \frac{M_x \cdot y_i}{\sum y_i^2} + \frac{M_y \cdot x_i}{\sum x_i^2} \\
 &= \frac{5.052,79}{4} + \frac{120,49 \cdot (-0,75)}{2,25} + \frac{(-30,77) \cdot (-0,75)}{2,25} \\
 &= 1263,198 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Tabel 7. Reaksi Tiang pada Kondisi ASD

Tiang	Fz/n	$M_x \cdot y / \sum y^2$	$M_y \cdot x / \sum x^2$	P tiang
Pile 1	1150,13	-17,50	-48,62	1084,01
Pile 2	1150,13	-17,50	48,62	1181,26
Pile 3	1150,13	17,50	-48,62	1119,01
Pile 4	1150,13	17,50	48,62	1216,25

Cek syarat:

$$P_{maks} = 1263,198 \text{ kN} \leq P_{izin} = 1864,14 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

e. Gaya Lateral yang Diterima Pile Akibat Beban ASD

$$\begin{aligned}
 h_{u \text{ mak}} &= \sqrt{h_{ux}^2 + h_{uy}^2} \\
 &= \sqrt{(-4,28)^2 + (-6,35)^2} \\
 &= 7,66 \text{ kN} \\
 \phi H_n &= 0,6 \times 82,31 \\
 &= 49,38 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

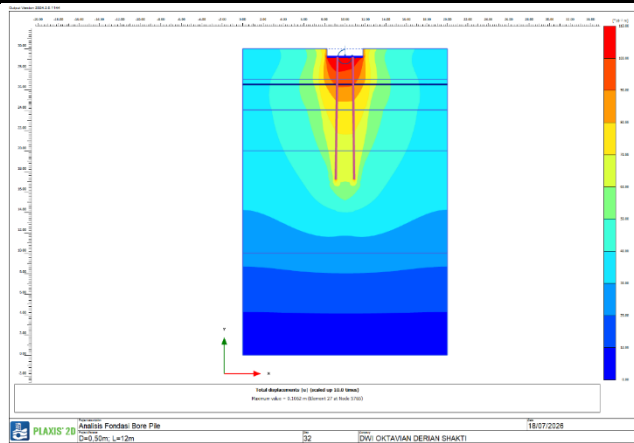
Cek Syarat Gaya Lateral

$$h_{u \text{ mak}} \leq \phi H_n$$

$$h_{u \text{ mak}} = 7,66 \text{ kN} < \phi H_n = 49,38 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$$

3.3 Hasil Analisis Metode Numerik (PLAXIS 2D)

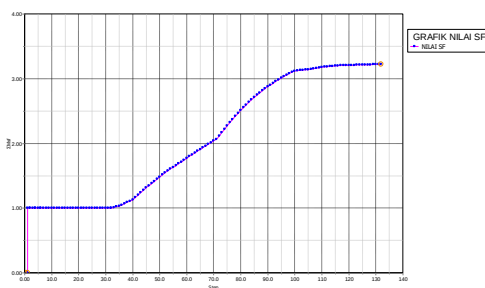
Analisis numerik dilakukan menggunakan PLAXIS 2D dengan metode staged construction yang meliputi kondisi tegangan awal (*Initial Phase*), pemasangan bored pile, penggalian tanah pile cap, pengecoran pile cap, dan pembebanan struktur atas. Hasil analisis menunjukkan bahwa penurunan (*total displacement*) meningkat pada setiap tahap konstruksi hingga mencapai nilai maksimum 10,62 cm setelah pembebanan struktur atas **Gambar 1**. Nilai tersebut masih lebih kecil dibandingkan penurunan izin sebesar 27,15 cm, sehingga fondasi dinyatakan aman terhadap penurunan.



Gambar 1. Total Displacement Phase 4 (Pembebanan Struktur Atas)

Selanjutnya, analisis stabilitas menggunakan metode phi-c reduction menghasilkan Safety Factor (SF) sebesar 3,22

Gambar 2. Nilai tersebut lebih besar dari persyaratan minimum 2,5 berdasarkan SNI 8460:2017, sehingga fondasi tiang bor yang direncanakan memenuhi persyaratan stabilitas dan layak digunakan.



Gambar 2. Grafik Safety Factor Hasil Analisis Phi-c Reduction PLAXIS 2D, SF = 3,22

3.4 Perbandingan Hasil Analisis

Perbandingan dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian antara hasil analisis metode empiris dengan metode numerik (PLAXIS 2D) pada dimensi fondasi terpilih yaitu $D = 0,5$ m dan $L = 12$ m. Parameter yang dibandingkan meliputi nilai penurunan fondasi dan nilai *safety factor*.

Tabel 8. Perbandingan Hasil Analisis Metode Empiris dan Numerik

Parameter	Metode Empiris (Meyerhof 1976)	Metode Numerik (PLAXIS 2D)
Safety Factor	3,52	3,22
Penurunan (cm)	1,45	10,62
Status SNI 8460:2017	Memenuhi	Memenuhi

Sumber: Hasil Analisis

Perbedaan nilai penurunan antara metode empiris (1,45 cm) dan numerik (10,62 cm) disebabkan kemampuan FEM dalam memodelkan kondisi tegangan tiga dimensi, interaksi tanah-

fondasi, dan tahapan konstruksi yang tidak dapat direpresentasikan oleh pendekatan empiris. Meskipun demikian, kedua metode memenuhi persyaratan SNI 8460:2017

3.5 Metode Pelaksanaan dan RAB

Mengingat kondisi tanah pasir lepas dan muka air tanah dangkal (3,5m), metode pelaksanaan yang direkomendasikan adalah kombinasi temporary casing dan wet drilling menggunakan bentonit. Casing dipasang di zona atas untuk mencegah kelongsoran, sedangkan *wet drilling* diterapkan di bawah muka air tanah.

Metode pelaksanaan fondasi tiang bor diawali dengan penandaan posisi tiang, dilanjutkan pengeboran menggunakan *temporary casing* dan metode *wet drilling* dengan bentonit. Setelah dasar lubang dibersihkan, dilakukan pemasangan tulangan dan pengecoran menggunakan pipa *tremie*. Tahapan berikutnya meliputi perapian kepala tiang (*pile head trimming*), pekerjaan galian pile cap, pengecoran lantai kerja, pemasangan tulangan *pile cap*, dan pengecoran *pile cap* hingga fondasi selesai.

Tabel 9. Rekapitulasi Rencana Anggaran Biaya (RAB)

No.	Uraian Pekerjaan	Jumlah Biaya (Rp)
1	Pekerjaan Persiapan	Rp 201.286.553,70
2	Pekerjaan Bored Pile	Rp 7.591.360.132,69
3	Pekerjaan Pile Cap	Rp 8.627.370.194,21
	Sub Total	Rp 16.420.016.880,60
	PPN 11%	Rp 1.806.201.856,87
	Total RAB	Rp 18.226.218.737,46
	Hasil Pembulatan	Rp 18.226.218.737,00

Sumber: Hasil Analisis Perhitungan

Berdasarkan **Tabel 9**, total Rencana Anggaran Biaya (RAB) pekerjaan fondasi tiang bor sebesar Rp 18.226.218.737,00 (termasuk PPN 11%), dengan pekerjaan *Pile cap* sebagai komponen biaya terbesar.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, disimpulkan:

- (1) Analisis ETABS menghasilkan gaya aksial maksimum kolom kritis 5.052,79 kN sebagai dasar perencanaan fondasi.
- (2) Metode empiris Meyerhof (1976) menghasilkan $Q_{g,all} = 5.929,20$ kN, $SF = 3,52 > 2,5$, dan penurunan 1,45 cm, memenuhi SNI 8460:2017.
- (3) Metode numerik PLAXIS 2D menghasilkan $SF = 3,22$ dan penurunan 10,62 cm, memenuhi SNI 8460:2017
- (4) Perbedaan penurunan antar metode disebabkan kemampuan FEM memodelkan interaksi tanah-fondasi lebih rinci, namun keduanya memenuhi SNI 8460:2017.

- (5) Metode pelaksanaan yang direkomendasikan adalah kombinasi *temporary casing* dan *wet drilling* dengan bentonit.
- (6) Total RAB adalah Rp 18.226.218.737,00 berdasarkan AHSP SE Bina Konstruksi Nomor 182 Tahun 2025.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Jaglien, L. Servie, O. Dapas, and S. E. Wallah, "Perencanaan Struktur Beton Bertulang Gedung Kuliah 5 Lantai," *Jurnal Sipil Statik*, vol. 8, no. 4, pp. 471–482, 2020.
- [2] K. Napitupulu and K. Indah Sari, "Analisis Daya Dukung dan Penurunan Pondasi Bored Pile Berdasarkan Data Pengujian CPT dengan Software PLAXIS pada Pembangunan Pasar Baru Panyabungan Kabupaten Mandailing Natal," *JTSIP*, vol. 2, no. 2, 2023.
- [3] B. R. Kasmana, G. P. Artiani, and L. Darmiyanti, "Analisis Daya Dukung Pondasi Bore Pile pada Proyek Pembangunan Fasilitas Perkeretaapian Manggarai–Jatinegara," *GJMI*, vol. 2, no. 8, pp. 117–124, 2024, doi: 10.59435/gjmi.v2i8.794.
- [4] H. C. Hardiyatmo, *Analisis dan Perancangan Fondasi I*, 4th ed. Yogyakarta, Indonesia: Gadjah Mada University Press, 2020.
- [5] D. Edina, M. Sholeh, and G. Aponno, "Studi Alternatif Perencanaan Pondasi Tiang Bor pada Proyek Pembangunan Gedung Fakultas Farmasi Universitas Airlangga Surabaya," *Jurnal Online Skripsi Manajemen Rekayasa Konstruksi (JOS-MRK)*, 2021.
- [6] Z. H. Saraswati et al., "Analisis Fondasi Bored Pile pada Tower A Proyek Rusun Rawa Buntu Serpong Tangerang Selatan," *Jurnal Teknik Sipil Terapan*, Dec. 2024.