

ANALISIS PENURUNAN DAN DEFLEKSI PONDASI *BORED PILE* PADA WILAYAH KOTA TIMUR GORONTALO

*Dwianto¹ dan Aristi Ayuningsi Ode Asri²

^{1,2}Fakultas Teknik, Universitas Negeri Gorontalo, Indonesia

*Corresponding Author, Received: Mar. 2026, Revised: May. 2026, Accepted: Jul. 2026

ABSTRACT: The foundation is a critical structural element that must safely transfer axial and lateral loads from a building to the supporting soil. Due to the variable bearing capacity of sandy soils across East City District, Gorontalo, general design correlations are often unreliable, making site-specific verification necessary. This study analyzes the axial settlement and lateral deflection of bored pile foundations for a Bank Indonesia branch office construction project in East City, Gorontalo, by comparing analytical methods (Poulos and Davis for settlement, Broms for lateral deflection), Plaxis 2D numerical modeling, and field loading tests. Results show the pile's axial bearing capacity reached 1,025.15 kN, producing a maximum settlement of 3.04 mm. Under a design load variation of 850 kN, settlement values were 2.5 mm (Poulos and Davis), 1.92 mm (Plaxis), and 2.03 mm (field test), with an average difference of 16.89%, indicating good agreement between analytical and field results for axial behavior in sandy soil. For lateral behavior, the maximum allowable lateral load was 114.99 kN, exceeding McNulty's required criterion, so no batter piles were needed. Lateral deflection analysis produced 5.49 mm under a 50 kN design load, compared to only 1.4 mm from the field lateral loading test, an average difference of 77%, both remaining below McNulty's 6 mm allowable limit. The much larger discrepancy in lateral deflection indicates that the conventional Broms method is considerably more conservative than actual field behavior. Overall, the bored pile foundation performed well within allowable limits, and the percentage differences obtained may serve as correction factors for future pile foundation designs in similar sandy soil conditions in Gorontalo, particularly where field test data are limited.

Keywords: Bored pile, Penurunan, Defleksi Lateral.

1. PENDAHULUAN

Pada waktu tiang dibebani, tiang akan mengalami pemendekan dan tanah di sekitarnya akan mengalami penurunan. Pondasi tiang juga harus dirancang dengan memperhitungkan beban-beban horisontal atau lateral, seperti: beban angin, atau tekanan tanah lateral. Besarnya beban lateral yang harus didukung pondasi tiang bergantung pada rangka bangunan yang mengirimkan gaya lateral tersebut ke kolom bagian bawah. Jika tiang dipasang vertikal dan dirancang untuk mendukung beban horisontal yang cukup besar, maka bagian atas dari tanah pendukung harus mampu menahan gaya tersebut, sehingga tiang-tiang tidak mengalami gerakan lateral yang berlebihan.

Kondisi tanah di wilayah Kota Gorontalo, termasuk Kecamatan Kota Timur, diketahui memiliki kapasitas dukung yang bervariasi antar kelurahan akibat perbedaan kedalaman lapisan tanah keras dan posisi geomorfologisnya; pada sejumlah lokasi kedalaman tanah keras dijumpai bervariasi hingga lebih dari 5 meter, sementara pada lokasi lain jauh lebih dangkal, sehingga masih ditemukan kasus retak-retak pada dinding bangunan

akibat pondasi yang tidak menumpu pada tanah keras (Pemetaan Kapasitas Dukung Tanah Berdasarkan Data Sondir di Kota Gorontalo, UNG). Kondisi tersebut menegaskan bahwa perencanaan pondasi tiang di Kota Gorontalo tidak dapat sepenuhnya mengandalkan korelasi umum, melainkan memerlukan verifikasi kapasitas dukung dan penurunan yang spesifik lokasi. Studi pada pembangunan Gedung Fakultas MIPA Universitas Negeri Gorontalo turut menunjukkan bahwa nilai penurunan tiang kelompok hasil hitungan analitis dapat berbeda cukup signifikan terhadap hasil pemodelan elemen hingga menggunakan Plaxis, sedangkan kajian mengenai pengaruh muka air tanah terhadap penurunan pondasi di beberapa kecamatan Kota Gorontalo memperlihatkan variasi nilai penurunan yang cukup besar antar lokasi. Temuan-temuan tersebut memperkuat perlunya kajian penurunan dan defleksi pondasi tiang yang dilakukan secara langsung pada lokasi proyek, dalam hal ini di wilayah Kota Timur Gorontalo.

Beberapa penelitian terdahulu telah membandingkan metode analitis Poulos and Davis dengan pemodelan numerik menggunakan program

Plaxis untuk memprediksi penurunan pondasi tiang bor, namun hasilnya menunjukkan tingkat kesesuaian yang beragam. Penelitian pada proyek pembangunan hotel di Lhokseumawe berdasarkan data Cone Penetration Test (CPT) melaporkan bahwa penurunan tiang tunggal menurut metode Poulos and Davis rata-rata mencapai 22,46 mm, jauh lebih besar dibandingkan hasil pemodelan Plaxis yang hanya sebesar 2,093 mm (Jurnal Teknologi Terapan dan Sains 4.0, 2025). Sebaliknya, Halawa (2023) pada proyek Jembatan Sicanang memperoleh penurunan tiang tunggal dengan metode Poulos and Davis sebesar 8,6 mm, mendekati hasil penurunan elastis sebesar 11,791 mm, sementara Akbar (2024) pada analisis pondasi spun pile mendapati penurunan menurut metode Poulos and Davis serta Vesic mencapai 38 mm, jauh lebih besar dibandingkan hasil pemodelan Plaxis. Pribadi dan Rumbyarso (2023) serta Fakhruddin dkk. (2022) yang membandingkan hitungan manual dengan program AllPile turut melaporkan adanya selisih nilai penurunan antar metode, sedangkan kajian pada Jurnal Syntax Admiration (2021) terhadap hasil Plaxis 3D dan loading test lapangan menunjukkan bahwa akurasi pemodelan numerik sangat dipengaruhi oleh kehalusan mesh yang digunakan. Perbedaan-perbedaan tersebut menegaskan bahwa keandalan metode analitis maupun numerik dalam memprediksi penurunan pondasi tiang bor masih sangat bergantung pada parameter tanah, jenis tiang, dan kondisi lapangan setempat, sehingga validasi terhadap data uji pembebanan langsung (loading test) pada lokasi kajian tetap diperlukan.

Pada aspek kapasitas dan defleksi lateral tiang, penelitian Kristianto dkk. (2017) pada tanah kohesif menunjukkan bahwa metode Broms (1964) menghasilkan defleksi maksimum tiang tunggal free-end pile yang jauh lebih besar dan bersifat konservatif dibandingkan metode elemen hingga, metode beda hingga (p-y curve), maupun hasil uji lateral test langsung di lapangan. Temuan serupa disampaikan oleh Kurnia dkk. (2023) yang membandingkan metode Broms dengan metode p-y curve pada kondisi tanah berlapis (lempung-pasir); metode Broms secara konsisten memberikan nilai defleksi yang lebih besar dibandingkan metode p-y curve maupun pengujian lateral lapangan, meskipun pada tanah pasir keduanya menunjukkan hasil yang relatif mendekati. Yulianti dkk. (2024) turut mengonfirmasi bahwa hasil metode p-y lebih mendekati hasil uji lateral statis dibandingkan

metode Broms, yang cenderung memberikan kenaikan defleksi secara linear dengan nilai yang lebih besar. Ketiga penelitian tersebut secara konsisten menegaskan bahwa metode analitis konvensional seperti Broms berpotensi bersifat konservatif, sehingga diperlukan data pengujian lapangan sebagai pembanding agar hasil analisis defleksi tiang lebih representatif terhadap kondisi aktual di lapangan.

Meskipun berbagai penelitian di atas telah mengkaji perbandingan metode analitis dan numerik untuk penurunan maupun defleksi lateral tiang secara terpisah, kajian yang memadukan analisis penurunan akibat beban aksial (metode Poulos and Davis dan pemodelan Plaxis) dengan analisis defleksi akibat beban lateral pada satu proyek konstruksi yang sama, sekaligus divalidasi langsung terhadap data uji pembebanan lapangan berupa loading test dan lateral loading test, masih terbatas dilakukan, terlebih untuk kondisi tanah spesifik di wilayah Kota Timur, Gorontalo (bandingkan dengan studi kasus pada Zain dkk., 2023, di Purwokerto). Ketersediaan data uji pembebanan aksial dan lateral pada proyek konstruksi bored pile di Kota Timur Gorontalo memberikan peluang untuk melakukan verifikasi silang antara hasil formulasi analitis, pemodelan numerik, dan kondisi aktual di lapangan, sehingga dapat diperoleh nilai prosentase perbedaan yang dapat dijadikan acuan atau faktor koreksi bagi perencanaan pondasi tiang bor pada kondisi tanah yang serupa di wilayah Gorontalo maupun daerah lain dengan karakteristik geoteknik yang sebanding. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis besaran penurunan akibat beban aksial dan defleksi akibat beban lateral pada pondasi tiang bor di wilayah Kota Timur Gorontalo dengan membandingkan hasil metode analitis (Poulos and Davis dan Broms), pemodelan numerik (Plaxis), serta pengujian lapangan.

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mengetahui nilai besaran penurunan yang terjadi pada tiang tunggal dengan menggunakan metode analitis dan uji pembebanan aksial tiang (*loading test*).
2. Mengetahui nilai defleksi tiang akibat pembebanan lateral pada tiang.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Penurunan (*Settlement*)

Secara umum, penurunan (*settlement*) tanah yang disebabkan oleh pembebanan dapat dibagi dalam dua kelompok besar, yaitu :

1. Penurunan elastik (*immediate settlement*), yang merupakan akibat dari deformasi tanah

kering, basah, dan jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air. Penurunan elastic umumnya didasarkan pada penurunan yang diturunkan dari teori elastisitas.

2. Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*), yang merupakan hasil perubahan volume tanah jenuh air sebagai akibat dari keluarnya air yang menempati pori-pori tanah.

Metode Poulos dan Davis (1980)

Penurunan kepala tiang yang terletak pada tanah homogeny dengan modulus elastis dan rasio Poisson yang konstan dapat dihitung dengan persamaan yang disarankan oleh Poulos dan Davis (1980), sebagai berikut:

a. Untuk tiang apung (*floating pile*)

$$S = \frac{QI}{Es.d} \quad (1)$$

$$I = I_o R_k R_h R_\mu \quad (2)$$

Dengan

S = Penurunan kepala tiang

Q = beban yang bekerja

I_o = factor pengaruh penurunan untuk tiang yang tidak mudah mampat (*incompressible*) dalam masa semi tak terhingga

R_k = factor koreksi kemudah-mampatan (kompresibilitas) tiang untuk $\mu = 0,5$

R_h = faktor koreksi untuk ketebalan lapisan yang terletak pada tanah keras

R_μ = faktor koreksi angka poisson μ

h = kedalaman total lapisan

b. Untuk tiang dukung ujung

$$S = \frac{QI}{Es.d} \quad (3)$$

$$I = I_o R_k R_b R_\mu$$

Dengan R_b = faktor koreksi untuk kekakuan lapisan pendukung.

Pengaruh kekerasan tanah pendukung tanah di dasar tiang adalah mengurangi penurunan. Pengaruh ini menjadi lebih jelas bila tiang relatif pendek (tiang kaku) dan terletak pada lapisan pendukung yang keras.

$$K = \frac{Ep RA}{Es} = \quad (4)$$

$$R_A = \frac{Ap}{\frac{1}{4}\pi d^2} = \quad (5)$$

E_p dan E_s berturut-turut adalah modulus elastis bahan tiang dan tanah, A_p adalah luas tampang tiang. Jika tiang makin kompresibel, maka K semakin kecil.

2.2 Defleksi Tiang Vertikal

Dalam perancangan fondasi tiang, tiang-tiang tidak dibolehkan mengalami defleksi lateral terlalu besar. Hal ini, karena jika kemiringan tiang terlalu besar, maka akan membahayakan stabilitas jangka panjang bangunan yang didukungnya. Ketika perpindahan lateral tiang kecil, maka kekuatan tanah masih belum termobilisasi sepenuhnya, sehingga persamaan-persamaan perpindahan tiang ke arah lateral umumnya didasarkan pada teori elastis.

Bangunan gedung, jembatan dan struktur-struktur semacamnya, umumnya gerakan lateral yang ditoleransikan hanya berkisar antara 6 mm sampai 18 mm. Karena itu, analisis beban-deformasi harus dilakukan guna menentukan besarnya beban lateral maksimum yang masih di diperbolehkan. Analisis ini juga mengevaluasi momen maksimum pada defleksi yang ditentukan.

Defleksi Tiang Metode Broms

Metode Broms (1964) dapat digunakan untuk menghitung defleksi lateral tiang yang berada pada lapisan tanah homogen dan murni berupa tanah kohesif (lempung jenuh, $\phi = 0$) atau granuler (pasir, $c = 0$).

Defleksi Tiang dalam Tanah Granuler

Untuk tiang dalam tanah granuler (pasir, kerikil), defleksi tiang akibat beban lateral, dikaitkan dengan besaran tak berdimensi αL dengan :

$$\alpha = \left(\frac{nh}{Ep Ip} \right)^{1/5} \quad (11)$$

1. Tiang ujung bebas dan ujung jepit dianggap sebagai tiang pendek (kaku), bila $\alpha L < 2$.

(1.a) Defleksi lateral tiang ujung bebas dipermukaan tanah

$$y_o = \frac{18H(1+1,33e/L)}{L^2 nh} \quad (12)$$

Rotasi tiang (θ) :

$$\theta = \frac{24 H(1+1,5e/L)}{L^3 nh} \quad (13)$$

(1.b) Defleksi lateral tiang ujung jepit

$$y_o = \frac{2H}{L^2 nh} \quad (14)$$

2. Tiang ujung bebas dan ujung jepit dianggap sebagai tiang panjang (tidak kaku), bila $\alpha L > 4$

(2.a) Defleksi lateral tiang ujung bebas (Poulos dan Davis, 1980)

$$y_o = \frac{2,4H}{(nh)^{0,6}(Ep Ip)^{0,4}} + \frac{1,6He}{(nh)^{0,4}(Ep Ip)^{0,6}} \quad (15)$$

Rotasi tiang

$$\theta = \frac{1,6H}{(nh)^{0,4}(Ep Ip)^{0,6}} + \frac{1,74He}{(nh)^{0,2}(Ep Ip)^{0,8}} \quad (16)$$

(2.b) Defleksi lateral tiang ujung jepit

$$y_o = \frac{0,93 H}{(nh)^{0,6}(E_p I_p)^{0,4}} \quad (17)$$

2.3 Analisis Tegangan-Regangan Menggunakan Program Plaxis

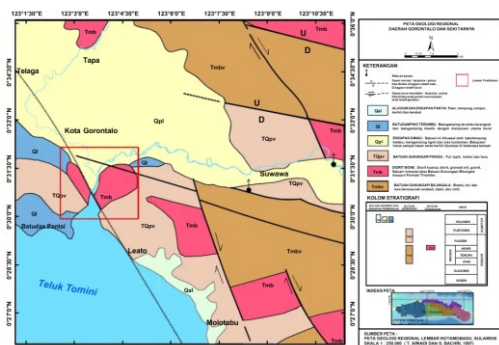
Plaxis adalah sebuah paket program yang disusun berdasarkan metode elemen hingga yang telah dikembangkan secara khusus untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas dalam bidang rekayasa geoteknik. Prosedur pembuatan model secara grafis yang mudah memungkinkan pembuatan suatu model elemen hingga yang rumit dapat dilakukan dengan cepat, sedangkan berbagai fasilitas yang tersedia dapat digunakan untuk menampilkan hasil komputasi secara mendetail. Proses perhitungannya sendiri sepenuhnya berjalan secara otomatis dan didasarkan pada prosedur numerik yang handal. Konsep ini memungkinkan para pemula untuk dapat menggunakan paket program ini hanya dengan mengikuti beberapa jam pelatihan saja. Secara umum tahapan metodologi perhitungan menggunakan *Plaxis 2D* terdiri dari tiga tahap, yaitu :

1. Tahap input data (*input*)
2. Tahap perhitungan (*calculation*)
3. Hasil perhitungan (*output*)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Lokasi Penelitian

Secara administratif penelitian ini dilakukan di Jl. By Pass Tamalate, Kota Timur, Kota Gorontalo, pada proyek pembangunan kantor cabang Bank Indonesia (BI), Provinsi Gorontalo dimana jenis tanah didominasi oleh lapisan tanah pasir hasil endapan sungai bone.



Gambar 1. Peta Geologi Daerah Kota Gorontalo dan Sekitarnya (S. Bachri, dkk, 1997)

3.2 Penurunan Tiang Metode Analisis

Besarnya penurunan yang timbul pada tiang berdampak langsung terhadap eksentrisitas

kolom yang menumpu di atasnya, sehingga pada akhirnya dapat memengaruhi kestabilan struktur bangunan secara keseluruhan. Atas dasar pertimbangan tersebut, kajian kuantitatif terhadap besaran penurunan tiang menjadi tahapan analisis yang esensial guna memastikan kinerja pondasi sesuai dengan yang direncanakan.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa besaran penurunan total tiang ($S_{total} = S_{friksi} + S_{end_bearing}$) = 3,04 mm. Nilai tersebut berada jauh di bawah batas penurunan izin sebesar 10% D ($10\% \times 50 \text{ cm} = 5 \text{ cm}$), yang mengindikasikan bahwa tiang bor pada lokasi kajian memiliki kinerja penurunan yang memadai dan tidak menunjukkan gejala penurunan berlebih (*excessive settlement*). Guna memvalidasi hasil perhitungan analitis tersebut, dilakukan pula analisis penurunan tiang berdasarkan pola pembebanan bertahap sebagaimana diterapkan pada pengujian pembebanan aksial atau *loading test vertical*. Adapun hasil nilai penurunan berdasarkan pola pembebanan pada *loading test vertical* ditunjukkan pada tabel 1 berikut.

Tabel 1. Penurunan Tiang dengan Pola Pembebanan pada *Loading Test*

No	% Pembebanan	Beban (kN)	I_{friksi}	$I_{end_bearing}$	E_s (kPa)	d (m)	S_{total} (mm)
1.00	25.00	212.50	0.10	0.11	140,000.00	0.50	0.63
2.00	50.00	425.00	0.10	0.11	140,000.00	0.50	1.26
3.00	75.00	637.50	0.10	0.11	140,000.00	0.50	1.89
4.00	100.00	850.00	0.10	0.11	140,000.00	0.50	2.52
5.00	125.00	1,062.50	0.10	0.11	140,000.00	0.50	3.15
6.00	150.00	1,275.00	0.10	0.11	140,000.00	0.50	3.78
7.00	175.00	1,487.50	0.10	0.11	140,000.00	0.50	4.41
8.00	200.00	1,700.00	0.10	0.11	140,000.00	0.50	5.04

Pola hasil analisis dengan variasi pembebanan bertahap tersebut memperlihatkan kecenderungan peningkatan penurunan yang berbanding lurus dengan penambahan beban pada kepala tiang, sebagaimana lazim dijumpai pada perilaku tiang bor di bawah beban aksial. Penurunan maksimum tercatat sebesar 0,005 m (5 mm) pada beban uji 1.700 kN, setara dengan 200% dari beban rencana per tiang sebesar 850 kN. Nilai penurunan yang diperoleh dari analisis dengan pola pembebanan *loading test* menunjukkan nilai penurunan maksimum tiang tetap berada di bawah ambang batas izin sebesar 5 cm, sehingga secara teknis tiang masih memenuhi kriteria keamanan terhadap penurunan berlebih meskipun telah dibebani hingga dua kali beban rencana.

3.3 Penurunan Tiang pada Pengujian Lapangan

Tabel 2. Penurunan Tiang Hasil Pengujian

No	% Pembebanan	Beban (kN)	S _{uji} (m)
1.00	25.00	212.50	0.00083
2.00	50.00	425.00	0.00173
3.00	75.00	637.50	0.00175
4.00	100.00	850.00	0.00203
5.00	125.00	1,062.50	0.00297
6.00	150.00	1,275.00	0.00460
7.00	175.00	1,487.50	0.00520
8.00	200.00	1,700.00	0.00616

Data hasil pengujian pembebanan lapangan yang disajikan pada table 2 memperlihatkan pola serupa, yaitu penurunan yang meningkat secara konsisten seiring bertambahnya beban uji pada ujung tiang. Penurunan maksimum sebesar 6,16 mm tercatat pada beban 170 ton, setara dengan 200% beban rencana untuk satu tiang. Nilai tersebut masih berada di bawah batas penurunan izin 10% D ($10\% \times 50 \text{ cm} = 5 \text{ cm}$), sehingga tiang dapat dinyatakan aman terhadap risiko penurunan berlebih, sekaligus mengonfirmasi konsistensi antara perilaku hasil uji lapangan dan prediksi analitis sebelumnya.

Perbandingan antara hasil analisis metode Poulos and Davis, pemodelan numerik Plaxis 2D, dan hasil pengujian pembebanan lapangan (loading test) sebagaimana diuraikan di atas menunjukkan pola yang konsisten, yaitu selisih rata-rata sebesar 16,89%. Tingkat kesesuaian ini tergolong baik apabila dibandingkan dengan temuan penelitian terdahulu; sebagai contoh, penelitian pada proyek hotel di Lhokseumawe melaporkan selisih yang jauh lebih besar antara metode Poulos and Davis (22,46 mm) dan Plaxis (2,093 mm), sedangkan pada proyek Jembatan Sicanang, Halawa (2023) memperoleh kesesuaian yang relatif dekat antara metode Poulos and Davis (8,6 mm) dan penurunan elastis (11,791 mm). Perbedaan tingkat kesesuaian antar penelitian tersebut mengindikasikan bahwa keandalan metode analitis Poulos and Davis sangat bergantung pada karakteristik tanah setempat, terutama homogenitas lapisan tanah dan kedalaman tanah keras, sehingga hasil kajian pada wilayah Kota Timur Gorontalo—dengan dominasi lapisan pasir hasil endapan sungai Bone—memberikan gambaran empiris yang spesifik lokasi dan tidak dapat digeneralisasi begitu saja pada kondisi geoteknik yang berbeda.

Ditinjau dari aspek mekanisme, penurunan total tiang bor merupakan kontribusi dari penurunan akibat tahanan gesek selimut tiang (skin friction) dan tahanan ujung tiang (end bearing). Pada tiang dengan kedalaman 15 m yang tertanam pada lapisan pasir seperti pada penelitian ini, kontribusi tahanan

gesek umumnya lebih dominan dibandingkan tahanan ujung, sehingga penurunan yang terjadi relatif kecil dan terjadi secara bertahap seiring peningkatan beban, sebagaimana ditunjukkan oleh pola linier-progresif pada tabel 1 dan tabel 2. Konsistensi pola tersebut antara hasil analisis dan hasil uji lapangan turut mengonfirmasi bahwa asumsi parameter tanah yang digunakan dalam perhitungan (modulus elastisitas dan rasio Poisson tanah) sudah cukup representatif terhadap kondisi aktual di lapangan..

3.4 Kapasitas Dukung Ijin Tiang Terhadap Gaya Lateral

Mengacu pada hasil analisis kapasitas dukung izin tiang terhadap gaya lateral, diperoleh nilai sebesar 114,990 kN (11,49 ton). Besaran ini melampaui ambang batas beban lateral izin untuk tiang vertikal pada tanah berpasir yang disyaratkan oleh McNulty, yaitu 3,17 ton, sehingga tiang bor pada lokasi kajian memiliki cadangan kapasitas lateral yang cukup memadai. Mengingat beban lateral rencana untuk satu tiang hanya ditetapkan sebesar 5 ton, kondisi ini menunjukkan bahwa tiang masih berada jauh dalam batas aman terhadap pembebanan lateral. Nilai kapasitas dukung izin lateral (H_a) tersebut selanjutnya dijadikan dasar bagi analisis defleksi tiang, dengan asumsi beban lateral maksimum yang bekerja pada tiang setara dengan nilai kapasitas dukung izin tersebut

3.5 Defleksi Tiang Akibat Beban Lateral

Dengan menggunakan parameter tanah dan beton yang telah ditetapkan sebelumnya, analisis defleksi tiang menghasilkan nilai defleksi sebesar 12,6 mm. Nilai tersebut ternyata melampaui batas defleksi maksimum yang disyaratkan oleh McNulty yakni sebesar 6 mm, sehingga kondisi pembebanan penuh sesuai kapasitas izin lateral berpotensi menimbulkan defleksi berlebih apabila tidak dikendalikan pada tahap pelaksanaan. Untuk mengevaluasi hal tersebut lebih lanjut, analisis defleksi kemudian diulang dengan variasi pembebanan bertahap, mengikuti skema yang diterapkan pada pengujian pembebanan lateral (lateral loading test). Hasil analisis ditunjukkan dalam tabel 3 berikut.

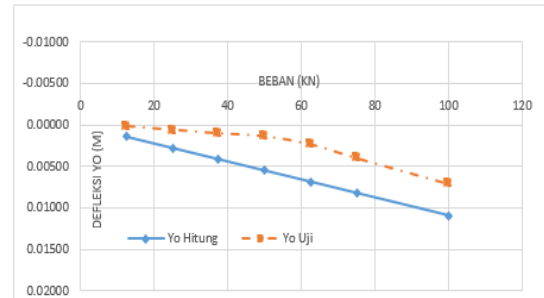
Tabel 3. Hasil Analisis Defleksi Tiang

No	% Beban	Beban (H) (kN)	E _p (kPa)	I _p (m ⁴)	n _h (kN/m ³)	Y _o (mm)	Y _{o_{uji}} (mm)
1	25	12.5	25,742,960.20	0.0031	9,977.40	1.37	0.20
2	50	25	25,742,960.20	0.0031	9,977.40	2.74	0.60
3	75	37.5	25,742,960.20	0.0031	9,977.40	4.12	1.00
4	100	50	25,742,960.20	0.0031	9,977.40	5.49	1.40
5	125	62.5	25,742,960.20	0.0031	9,977.40	6.86	2.40
6	150	75	25,742,960.20	0.0031	9,977.40	8.23	3.90
7	200	100	25,742,960.20	0.0031	9,977.40	10.98	7.10

Data pada tabel 3 memperlihatkan pola peningkatan defleksi tiang yang konsisten seiring bertambahnya beban lateral yang diberikan, sejalan dengan perilaku yang diprediksi oleh teori balok di atas tumpuan elastis (*beam on elastic foundation*). Defleksi maksimum diperoleh pada beban terbesar, yaitu 100 kN, dengan nilai 10,98 mm menurut metode analisis dan 7,10 mm menurut hasil pengujian lapangan. Kedua nilai tersebut telah melampaui batas defleksi izin untuk bangunan gedung sebesar 6 mm, sehingga secara praktis tiang tidak diperkenankan menerima beban sebesar 200% dari beban rencana atau lebih tanpa risiko defleksi berlebih. Pada kondisi perencanaan, satu tiang dirancang memikul beban sebesar 5 ton, dan pada taraf pembebanan tersebut defleksi yang terjadi tercatat sebesar 5,49 mm menurut metode analisis dan 1,40 mm menurut hasil pengujian lapangan. Kedua nilai tersebut masih berada di bawah batas defleksi maksimum yang disyaratkan McNulty sebesar 6 mm, sehingga tiang pada kondisi beban rencana masih memenuhi kriteria kekakuan lateral yang disyaratkan. Validasi hasil analisis defleksi terhadap data uji lapangan menunjukkan rata-rata selisih sebesar 77%, sebuah perbedaan yang tergolong besar dan akan dibahas lebih lanjut berikut ini.

Besarnya selisih antara hasil analisis defleksi dan data uji lapangan tersebut penting untuk dicermati lebih mendalam, mengingat metode analitis dan kondisi lapangan aktual pada dasarnya bertumpu pada asumsi dan parameter yang tidak sepenuhnya identik. Perbedaan nilai defleksi yang cukup signifikan antara hasil analisis dan hasil pengujian lapangan (*insitu test*) diduga dipengaruhi oleh beberapa faktor yang saling berkaitan. Pertama, pelaksanaan pengeboran dan pengecoran di lapangan lazim menghasilkan diameter aktual tiang yang sedikit lebih besar dari diameter rencana, sebagai akibat dari ketidaksempurnaan dinding lubang bor maupun tekanan lateral beton segar terhadap tanah di sekelilingnya. Pembesaran diameter tersebut berdampak langsung pada peningkatan momen inersia penampang tiang (I), yang menurut teori balok elastis berbanding terbalik dengan besaran defleksi—semakin besar momen inersia, semakin kecil defleksi yang timbul. Kedua, kedudukan muka air tanah turut memengaruhi kekakuan lateral tanah di sekitar tiang; pada kondisi muka air tanah dangkal, nilai modulus reaksi subgrade tanah jenuh cenderung lebih rendah dibandingkan tanah kering atau lembab, sehingga tanah memberikan tahanan lateral yang lebih kecil dan menyebabkan defleksi aktual di lapangan dapat berbeda cukup jauh dari hasil analisis yang mengasumsikan parameter tanah pada kondisi tertentu. Kombinasi kedua faktor tersebut turut menjelaskan mengapa prosentase perbedaan pada aspek defleksi lateral (77%) jauh lebih besar

dibandingkan pada aspek penurunan aksial (16,89%), mengingat defleksi lateral jauh lebih peka terhadap variasi kekakuan tanah pada kedalaman dangkal, sedangkan penurunan aksial lebih dipengaruhi oleh tahanan ujung dan selimut tiang pada kedalaman yang lebih besar dan relatif lebih homogen. Grafik defleksi tiang vertikal ditunjukkan pada gambar 4 berikut.



Gambar 4. Grafik Defleksi Tiang Pondasi

Temuan mengenai besarnya selisih pada aspek defleksi lateral (77%) sejalan dengan hasil-hasil penelitian terdahulu yang mengkaji perbandingan metode analitis dengan kondisi aktual di lapangan. Kristianto dkk. (2017) misalnya melaporkan bahwa metode Broms (1964) cenderung menghasilkan nilai defleksi yang jauh lebih besar dan bersifat konservatif dibandingkan hasil uji lateral langsung di lapangan, sementara Kurnia dkk. (2023) dan Yulianti dkk. (2024) turut mengonfirmasi bahwa pendekatan berbasis kurva *p-y* umumnya memberikan hasil yang lebih mendekati kondisi lapangan dibandingkan metode Broms yang bersifat linier. Konsistensi arah perbedaan pada penelitian ini dengan studi-studi tersebut—yaitu hasil analisis yang secara sistematis lebih besar daripada hasil uji lapangan—memperkuat dugaan bahwa metode analitis konvensional untuk defleksi lateral memang cenderung bersifat konservatif, sehingga penggunaannya pada tahap perencanaan awal tetap relevan sebagai batas atas (*upper bound*) yang aman, namun idealnya tetap dikonfirmasi dengan data uji lapangan sebelum finalisasi desain.

Implikasi praktis dari besarnya selisih pada aspek defleksi ini adalah perlunya kehati-hatian tambahan dalam penerapan hasil analisis untuk pengambilan keputusan desain, khususnya terkait penetapan beban lateral maksimum yang diizinkan. Mengingat defleksi hasil analisis pada beban 100 kN (200% beban rencana) telah melampaui batas izin McNulty sebesar 6 mm, sedangkan hasil uji lapangan pada beban yang sama masih menunjukkan defleksi yang jauh lebih kecil, maka keputusan untuk membatasi beban kerja tiang tidak melebihi beban rencana (50 kN) merupakan langkah konservatif yang tetap disarankan, terlepas dari kecilnya defleksi aktual di lapangan, mengingat variabilitas kondisi tanah pada proyek konstruksi umumnya tidak dapat diprediksi secara seragam di

seluruh titik tiang.

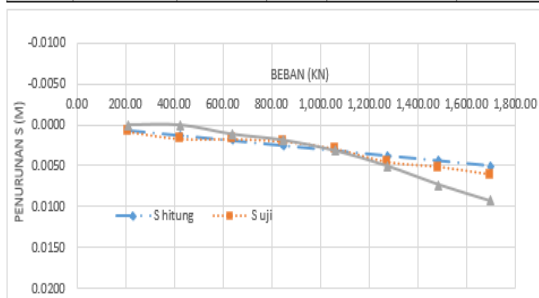
3.6 Persentase Perbedaan Nilai Penurunan

Besaran prosentase perbedaan antara hasil analisis dan hasil pengujian lapangan merupakan informasi yang penting bagi perencana, karena nilai tersebut berpotensi dimanfaatkan sebagai faktor koreksi empiris pada tahap analisis apabila data pengujian pembebanan lapangan (loading test) tidak tersedia pada suatu proyek konstruksi.

Perbandingan hasil analisis penurunan menggunakan metode Poulos and Davis, pengujian lapangan (insitu test), serta analisis penurunan menggunakan program Plaxis 2D dengan pola pembebanan loading test ditunjukkan pada tabel 4 berikut.

Tabel 4. Persentase Perbedaan Nilai Penurunan

No	% Pembebanan	Beban (kN)	S _{total} (mm)	S _{uji} (mm)	S _{plaxis} (mm)	Prosentase Perbedaan
1.00	25.00	212.50	0.60	0.83	0.04	24.14
2.00	50.00	425.00	1.30	1.73	0.07	27.00
3.00	75.00	637.50	1.90	1.75	1.19	7.62
4.00	100.00	850.00	2.50	2.03	1.92	19.40
5.00	125.00	1,062.50	3.10	2.97	3.20	5.66
6.00	150.00	1,275.00	3.80	4.60	5.06	17.87
7.00	175.00	1,487.50	4.40	5.20	7.33	15.24
8.00	200.00	1,700.00	5.00	6.16	9.30	18.23



Gambar 5. Grafik Perbandingan Nilai Penurunan

Mengacu pada data hasil analisis penurunan tiang pada tabel 4 di atas, terlihat kecenderungan peningkatan penurunan tiang yang sejalan dengan bertambahnya beban yang bekerja. Penurunan maksimum terjadi pada taraf pembebanan tertinggi, yaitu 1.700 kN, dengan besaran penurunan sebesar 0,0050 m. Nilai hasil perhitungan tersebut selanjutnya divalidasi terhadap hasil pengujian lapangan serta hasil pemodelan numerik menggunakan program Plaxis 2D dimana prosentase perbedaan antara hasil analisis dan pengujian lapangan (insitu test) jika dirata-ratakan ialah sebesar 16,89%. Secara prinsip, besaran penurunan tiang sangat dipengaruhi oleh diameter penampang tiang, di mana penampang yang lebih besar akan menghasilkan penurunan yang relatif lebih kecil akibat luas bidang kontak dan tahanan ujung yang lebih besar. Kecenderungan nilai penurunan hasil pengujian lapangan yang sedikit lebih kecil dibandingkan hasil analisis diduga berkaitan dengan pembesaran diameter aktual tiang

pada saat pelaksanaan pengeboran dan pengecoran, sebuah fenomena yang umum dijumpai pada konstruksi bored pile akibat keruntuhan lokal dinding lubang bor maupun tekanan lateral beton segar terhadap tanah di sekitarnya. Meskipun demikian, selisih rata-rata sebesar 16,89% tersebut tergolong kecil dan berada pada rentang yang wajar untuk metode elastis semi-empiris seperti Poulos and Davis, sehingga hasil analisis dapat dijadikan pijakan yang cukup andal bagi perencanaan pondasi tiang bor pada proyek yang tidak memiliki data pengujian pembebanan lapangan atau insitu test dan dapat menghemat waktu pekerjaan konstruksi mengingat pengujian pembebanan tiang membutuhkan waktu cukup lama tergantung dari besaran beban ijin tiang.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kinerja pondasi tiang bor pada proyek pembangunan kantor cabang Bank Indonesia di wilayah Kota Timur Gorontalo tergolong baik, baik ditinjau dari aspek penurunan akibat beban aksial maupun defleksi akibat beban lateral, dengan seluruh nilai pada kondisi beban rencana masih berada dalam batas yang diizinkan. Namun demikian, tingkat kesesuaian antara hasil analisis dan hasil pengujian lapangan berbeda cukup signifikan antara kedua aspek tersebut: selisih rata-rata sebesar 16,89% pada aspek penurunan tergolong kecil dan menunjukkan bahwa metode analitis Poulos and Davis maupun pemodelan Plaxis 2D dapat diandalkan untuk memprediksi perilaku aksial tiang bor pada tanah pasir di wilayah kajian, sedangkan selisih sebesar 77% pada aspek defleksi lateral mengindikasikan bahwa metode analitis konvensional (Broms) memiliki keterbatasan yang lebih besar dalam merepresentasikan perilaku lateral aktual tiang. Perbedaan tingkat keandalan ini konsisten dengan pola yang dilaporkan pada berbagai penelitian terdahulu di lokasi lain, dan menegaskan bahwa validasi terhadap data uji pembebanan lapangan tetap menjadi langkah penting, terutama pada analisis defleksi lateral, sebelum hasil analisis dijadikan dasar pengambilan keputusan desain akhir. Nilai-nilai prosentase perbedaan yang diperoleh pada penelitian ini juga berpotensi dimanfaatkan sebagai faktor koreksi awal bagi perencanaan pondasi tiang bor pada proyek-proyek lain dengan karakteristik tanah pasir yang serupa di wilayah Gorontalo, khususnya pada kondisi keterbatasan data uji lapangan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan sebagai berikut

1. Tiang bor mengalami penurunan maksimum sebesar 3,04 mm pada beban ijin sebesar

- 1.025,15 kN. Dengan mengikuti pola pembebanan sebagaimana diterapkan pada pengujian loading test, diperoleh nilai penurunan sebesar 2,5 mm menurut Metode Poulos and Davis, 1,90 mm berdasarkan program Plaxis, dan 2,03 mm dari hasil pengujian lapangan, ketiganya pada beban ijin 850 kN. Baik hasil analisis maupun hasil pengujian di lapangan menunjukkan nilai penurunan yang masih berada di bawah batas penurunan yang diijinkan (Sijin), yaitu 10% D atau setara 5 cm
2. Pada beban ijin hasil analisis, defleksi maksimum tiang akibat tekanan lateral tercatat sebesar 12,6 mm. Namun, dengan mengikuti pola pembebanan pada lateral loading test, defleksi tiang yang diperoleh menjadi 5,49 mm menurut metode analisis dan 1,4 mm berdasarkan pengujian lapangan (insitu test). Kedua nilai tersebut masih berada di bawah batas defleksi maksimum yang disyaratkan McNulty, yaitu 6 mm. Defleksi tiang baru akan melampaui batas tersebut apabila beban yang diterima melebihi beban rencana sebesar 50 kN.
 3. Rata-rata selisih antara hasil analisis dan hasil pengujian lapangan tercatat sebesar 16,89% untuk besaran penurunan, sedangkan untuk defleksi tiang akibat tekanan lateral sebesar 77%..
- ## 5. REFERENCES
- [1] Azizi, (2000). Applied Analysis in Geotechnic. E and FN SPON.
 - [2] Bowles, (1997). Foundation Analysis and Design. McGraw Hill International Book Company.
 - [3] Hardiyatmo, H.C, (2011). Analisis dan Perancangan Fondasi 2. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
 - [4] Fahri, Medi. (2009). Studi Stabilitas Sistem Pondasi Bored Pile pada Jembatan Kereta Api Cirebon-Kroya. Skripsi Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung.
 - [5] Akbar, R. (2024). Analisis Kapasitas Daya Dukung dan Penurunan Pondasi Spun Pile. Jurnal Ilmiah Sultan Agung.
 - [6] Das, B. M. (2011). *Principles of Foundation Engineering* (7th ed.). Cengage Learning
 - [7] Fakhruddin, L., Hidayat, A. K., & Sari, N. K. (2022). Analisis Daya Dukung dan Penurunan Pondasi Tiang Bor (Bored Pile) Menggunakan Program AllPile 7.3B. Jurnal Akselerasi: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil, 4(1).
 - [8] Halawa. (2023). Analisa Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Menggunakan Metode Analitis dan Metode Numerik dengan Program Plaxis pada Proyek Pembangunan Jembatan Sicanang. Jurnal Teknik Sipil, Universitas Islam Sumatera Utara.
 - [9] Jurnal Syntax Admiration. (2021). Analisis Daya Dukung dan Penurunan Pondasi Tiang Bor dengan Plaxis 3D terhadap Hasil Loading Test.
 - [10] Jurnal Teknologi Terapan dan Sains 4.0. (2025). Analisis Daya Dukung Pondasi Tiang Berdasarkan Data Cone Penetration Test (CPT) dan Pemodelan Plaxis. Vol. 6.
 - [11] Kristianto, A., Surjandari, N. S., & Djarwanti, N. (2017). Analisis Defleksi Lateral Tiang Tunggal Free-End Pile pada Tanah Kohesif. Matriks Teknik Sipil
 - [12] Kurnia, Riza, & Pratiwi. (2023). Pendekatan Metode Broms terhadap Metode P-Y Curve pada Analisis Kapasitas Dukung Lateral Pondasi Tiang. Jurnal Teknik Sipil, 17(3), 174-180
 - [13] Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). Pile Foundation Analysis and Design. New York: John Wiley & Sons
 - [14] Pribadi, G., & Rumbyarso, Y. P. A. (2023). Analisis Perbandingan Daya Dukung dan Penurunan Pondasi Tiang Bor dengan Perhitungan Manual dan Software ALLPILE. Jurnal TESLINK: Teknik Sipil dan Lingkungan, 5(2) 16-20.
 - [15] Universitas Negeri Gorontalo. Pemetaan Kapasitas Dukung Tanah Berdasarkan Data Sondir di Kota Gorontalo. UNG Repository.
 - [16] Universitas Negeri Gorontalo, Fakultas Teknik. Pengaruh Muka Air Tanah terhadap Penurunan Fondasi Dangkal, Studi Kasus Kota Gorontalo. Jurnal Fropil.
 - [17] Yulianti, dkk. (2024). Analisis Kapasitas Lateral Fondasi Tiang Pancang dengan Metode Broms dan Metode P-y. Jurnal Akselerasi: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil.
 - [18] Zain, R., Azizi, A., & Salim, M. A. (2023). Analisis Daya Dukung dan Penurunan Pondasi Tiang Bor pada Proyek Pembangunan Gedung K Universitas Muhammadiyah Purwokerto. CIVeng
 - [19] Muhammad Yazid. (2014). Studi Stabilitas Pelabuhan Tanjung Priok Jakarta. Skripsi Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung