

JURNAL KONSTRUKSI DAN INFRASTRUKTUR

Teknik Sipil dan Perencanaan

ANALISIS DAYA DUKUNG DAN PENURUNAN FONDASI BORED PILE BERDASARKAN N-SPT, PLAXIS 2D, DAN PENGUJIAN LAPANGAN PADA PROYEK MAKASSAR NEW PORT

Adhetea Anggun Gitario Ajitama^{1*}, Muhamad Yusa¹, Gunawan Wibisono¹

^{1*)} Magister Teknik Sipil, Universitas Riau, Riau

Email Penulis Korespondensi : adhetea.anggun7933@grad.unri.ac.id

Nomor HP Penulis Korespondensi: 082393335908

ABSTRACT

Pile foundations in reclaimed areas require an evaluation of bearing capacity and settlement through analytical, numerical, and field-testing approaches. This study aims to compare the shaft resistance, end bearing resistance, and ultimate capacity of bored piles using the Meyerhof, Reese & Wright, and Luciano Decourt methods; analyze settlement using the Fellenius, Vesic, and PLAXIS 2D methods; and evaluate their agreement with PDA/CAPWAP and Static Loading Test (SLT) results. The research data were obtained from BH-02, including N-SPT values, soil parameters, foundation geometry, loading conditions, and field test results. The analyzed bored pile has a diameter of 1.20 m and a length of 29.2 m. The results show that the highest end bearing resistance was 692 tons based on the Luciano Decourt method, while the lowest was 276 tons based on the Meyerhof method. The ultimate capacities obtained using Meyerhof, Luciano Decourt, and Reese & Wright were 1,023, 1,323, and 2,166 tons, respectively, while the PDA/CAPWAP result was 1,189.98 tons. The SLT result of 1,911 tons was used as the reference ultimate capacity. Reese & Wright produced the capacity closest to the SLT result. Fellenius yielded a settlement of 14.22 mm, closest to the SLT value of 13.40 mm, while Vesic and PLAXIS 2D yielded 23.47 mm and 23.70 mm, respectively. The results indicate that the closest analytical method varies depending on the field test used as the reference.

Keyword: bearing capacity, bored pile, PLAXIS 2D, PDA/CAPWAP, settlement

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur pelabuhan pada kawasan reklamasi menghadirkan tantangan geoteknik karena struktur fondasi harus bekerja pada lapisan tanah dengan karakteristik dan tingkat daya dukung yang bervariasi. Pelabuhan merupakan salah satu infrastruktur strategis yang berperan penting dalam mendukung konektivitas, distribusi barang, serta aktivitas perdagangan nasional dan internasional [1]. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan terhadap infrastruktur pelabuhan, pembangunan fasilitas pelabuhan pada wilayah dengan keterbatasan lahan mendorong pemanfaatan kawasan perairan melalui reklamasi [2], [3]. Kondisi tersebut menghadirkan tantangan geoteknik karena struktur dibangun pada lapisan tanah yang memiliki karakteristik dan tingkat daya dukung yang berbeda dibandingkan kondisi tanah alami. Oleh karena itu, aspek keamanan dan kinerja fondasi menjadi salah satu faktor penting dalam menjamin kestabilan struktur pelabuhan dalam jangka panjang [4], [5], [6].

Makassar New Port merupakan salah satu infrastruktur pelabuhan yang dibangun pada kawasan hasil reklamasi di Makassar, Sulawesi Selatan [7]. Dermaga pada proyek ini direncanakan untuk melayani kapal container dan cargo dengan kapasitas hingga 55.000 DWT serta memiliki umur rencana bangunan 100 tahun [8]. Struktur dermaga menggunakan kombinasi fondasi secant pile dan bored pile untuk

mentransfer beban struktur ke lapisan tanah yang memiliki daya dukung memadai. Fondasi bored pile yang dianalisis dalam penelitian ini memiliki diameter 1,20 m dan panjang 29,2 m. Data kondisi tanah diperoleh dari titik penyelidikan BH-02 yang digunakan sebagai dasar untuk menentukan stratifikasi tanah dan parameter geoteknik dalam analisis fondasi. Kondisi tanah yang berubah terhadap kedalaman tersebut perlu dipertimbangkan karena memengaruhi kontribusi tahanan selimut dan tahanan ujung serta respons penurunan fondasi.

Salah satu tantangan utama pada pembangunan fondasi di atas tanah reklamasi adalah menentukan kapasitas fondasi yang sesuai dengan kondisi tanah aktual. Penyelidikan geoteknik diperlukan untuk memperoleh informasi mengenai karakteristik lapisan tanah, salah satunya melalui *Standard Penetration Test* (SPT) [9]. Nilai N-SPT dapat digunakan sebagai dasar untuk memperkirakan kondisi kepadatan atau konsistensi tanah serta kapasitas daya dukung fondasi [10]. Namun, hubungan antara nilai N-SPT dan kapasitas fondasi bergantung pada formulasi empiris serta parameter tanah yang digunakan dalam masing-masing metode [11]. Selain itu, perbedaan formulasi dan asumsi pada metode empiris dalam mengonversi nilai N-SPT menjadi tahanan selimut dan tahanan ujung dapat menghasilkan estimasi kapasitas fondasi yang berbeda. Oleh karena itu, penggunaan beberapa metode analitis dan validasi terhadap hasil pengujian lapangan diperlukan untuk memperoleh evaluasi kapasitas fondasi yang lebih representatif.

Berbagai metode empiris telah digunakan untuk memperkirakan kapasitas daya dukung bored pile berbasis N-SPT tetapi perbedaan formulasi dan asumsi dapat menghasilkan estimasi yang berbeda terhadap kondisi aktual. Penelitian yang dilakukan [12] dimana membandingkan kapasitas bored pile berdasarkan N-SPT dengan hasil PDA Test dan menunjukkan adanya perbedaan kapasitas antar metode analitis. Di sisi lain, pendekatan metode elemen hingga juga dapat menghasilkan respons kapasitas yang berbeda dibandingkan metode empiris berbasis data SPT maupun sondir [13]. Hal ini menunjukkan bahwa evaluasi kapasitas fondasi perlu mempertimbangkan karakteristik tanah serta mekanisme tahanan selimut dan tahanan ujung yang direpresentasikan oleh setiap pendekatan.

Selain kapasitas daya dukung, penurunan merupakan parameter penting dalam mengevaluasi kinerja fondasi karena kapasitas dukung yang memadai tidak selalu menjamin deformasi fondasi berada dalam batas yang dapat diterima [14]. Evaluasi penurunan menjadi semakin penting ketika hasil analisis digunakan untuk merepresentasikan respons fondasi terhadap pembebanan aktual.

Penelitian terdahulu menunjukkan adanya variasi respons penurunan antara pendekatan analitis, PLAXIS 2D, PLAXIS 3D, dan loading test [15]. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa hasil analisis kapasitas dan penurunan perlu dievaluasi terhadap hasil pengujian lapangan untuk mengetahui tingkat kesesuaiannya pada kondisi proyek tertentu.

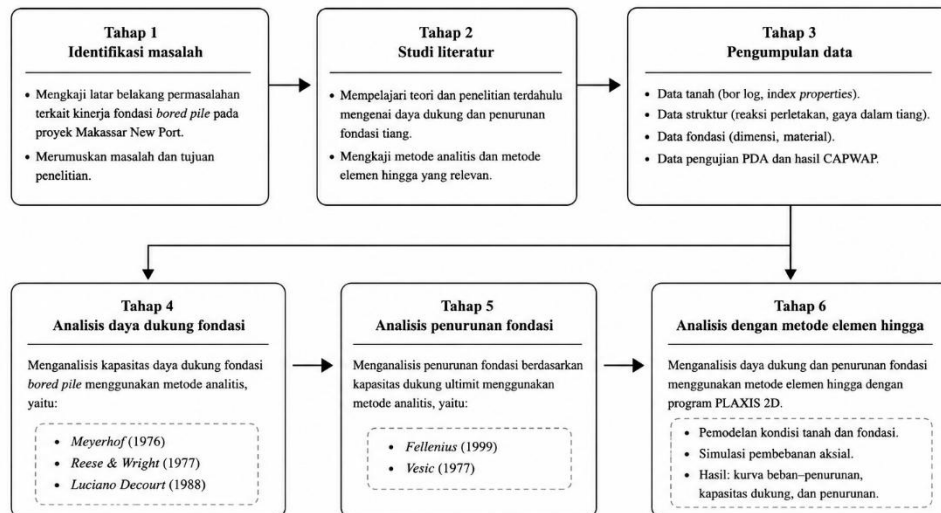
Meskipun penelitian mengenai kapasitas dan penurunan bored pile berdasarkan data SPT, pemodelan elemen hingga, maupun pengujian lapangan telah dilakukan, kajian yang mengevaluasi secara bersamaan komponen tahanan selimut, tahanan ujung, kapasitas ultimit, dan penurunan pada bored pile di kawasan reklamasi masih terbatas. Selain itu, keterkaitan antara hasil pendekatan empiris berbasis N-SPT, pemodelan PLAXIS 2D, serta pengujian dinamik dan statik pada objek fondasi yang sama belum ditunjukkan secara terpadu dalam konteks Proyek Makassar New Port. Oleh karena itu, penelitian ini membandingkan dan mengevaluasi metode Meyerhof, Reese & Wright, dan Luciano Decourt untuk kapasitas daya dukung, metode Fellenius dan Vesic untuk penurunan, serta pemodelan PLAXIS 2D dengan hasil pengujian PDA/CAPWAP dan Static Loading Test pada fondasi bored pile Proyek Makassar New Port. Pendekatan tersebut digunakan untuk mengidentifikasi kesesuaian hasil analisis kapasitas dan penurunan terhadap hasil pengujian lapangan pada kondisi tanah dan fondasi yang diteliti.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) membandingkan tahanan selimut, tahanan ujung, dan kapasitas ultimit fondasi bored pile berdasarkan metode Meyerhof, Reese & Wright, dan Luciano Decourt; (2) menganalisis penurunan fondasi menggunakan metode Fellenius, Vesic, dan pemodelan PLAXIS 2D; serta (3) mengevaluasi kesesuaian hasil analitis dan numerik terhadap hasil pengujian PDA/CAPWAP dan Static Loading Test pada Proyek Makassar New Port.

2.1 Lokasi dan Objek Penelitian

Gambar 1. Lokasi Penelitian Proyek Makassar New Port

Data yang digunakan dalam penelitian merupakan data sekunder yang diperoleh dari hasil penyelidikan dan pengujian yang dilakukan oleh pihak pelaksana proyek. Data penelitian meliputi data *bore log* BH-02, nilai N-SPT, parameter tanah, geometri dan material fondasi, data pembebanan struktur, serta hasil pengujian lapangan berupa PDA/CAPWAP dan Static Loading Test (SLT). Titik BH-02 digunakan sebagai acuan kondisi tanah pada area perencanaan fondasi. Fondasi yang dianalisis berupa *bored pile* dengan diameter 1,20 m dan kedalaman 29,2 m. Material beton memiliki kuat tekan (f_c) sebesar 37 MPa. Data geometri dan material fondasi tersebut digunakan sebagai dasar dalam perhitungan kapasitas aksial dan analisis penurunan. Data N-SPT digunakan sebagai parameter utama dalam metode empiris Meyerhof (1976), Reese & Wright (1977), dan Luciano Decourt (1988). Nilai N-SPT yang digunakan mengikuti hasil penyelidikan pada BH-02 dan diperhitungkan berdasarkan lapisan tanah yang dilalui tiang. Pada lapisan tanah yang berbeda, kontribusi tahanan selimut dihitung berdasarkan kondisi masing-masing lapisan dan kemudian dijumlahkan sepanjang kedalaman tiang. Berikut ini merupakan Gambar 2 yang menunjukkan alur penelitian secara keseluruhan.



Gambar 2. Alur penelitian analisis kapasitas daya dukung dan penurunan fondasi bored pile

2.3 Analisis Kapasitas Daya Dukung

Kapasitas daya dukung aksial fondasi dianalisis berdasarkan data N-SPT menggunakan metode Meyerhof (1976), Luciano Decourt (1988), dan Reese & Wright (1977). Kapasitas daya dukung ultimit merupakan penjumlahan antara tahanan selimut dan tahanan ujung yang dinyatakan sebagai:

$$Q_{ult} = Q_s + Q_p \quad (1)$$

Keterangan:

Q_{ult} : kapasitas daya dukung ultimit

Q_s : tahanan selimut

Q_p : tahanan ujung

2.3.1 Metode Meyerhof

Pada metode Meyerhof, kapasitas tahanan ujung ditentukan berdasarkan tekanan ultimit pada dasar tiang dan luas penampang ujung tiang sedangkan tahanan selimut ditentukan dari kontribusi gesekan sepanjang permukaan tiang. Secara umum digunakan hubungan:

$$Q_p = q_p \cdot A_p \quad (2)$$

$$Q_s = f_s \cdot A_s \quad (3)$$

dengan q_p dan f_s ditentukan berdasarkan korelasi N-SPT yang digunakan dalam metode Meyerhof serta nilai N-SPT representatif pada zona ujung dan sepanjang selimut tiang. Perhitungan dilakukan dengan mempertimbangkan nilai N-SPT pada lapisan tanah yang dilalui tiang. Nilai tahanan ujung dibatasi berdasarkan ketentuan kapasitas maksimum yang digunakan dalam formulasi Meyerhof.

2.3.2 Metode Reese & Wright

Metode Reese & Wright (1977) digunakan untuk menentukan kapasitas aksial tiang berdasarkan tahanan ujung dan tahanan selimut. Tahanan ujung dihitung dengan:

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

sedangkan tahanan selimut dihitung sebagai akumulasi tahanan geser satuan pada setiap segmen tiang:

$$Q_s = f_s \cdot A_s \quad (5)$$

Atau untuk setiap segmen:

$$\Delta Q_{s,i} = F_{s,i} \cdot p \cdot \Delta L_i \quad (6)$$

Dengan (f_s) adalah tahanan selimut satuan, (P) adalah keliling tiang, (ΔL_i) adalah panjang segmen tiang, (q_p) adalah tahanan ujung satuan, dan (A_p) adalah luas penampang ujung tiang. Nilai parameter ditentukan berdasarkan nilai N-SPT dan jenis tanah pada masing-masing lapisan sesuai korelasi Reese & Wright.

2.3.3 Metode Luciano Decourt

Metode Luciano Decourt menggunakan nilai N-SPT untuk memperkirakan tahanan selimut dan tahanan ujung bored pile. Secara umum, tahanan selimut dihitung dari nilai tahanan geser satuan yang dikorelasikan dengan N-SPT sepanjang badan tiang sedangkan tahanan ujung ditentukan berdasarkan nilai N-SPT representatif pada zona ujung tiang.

$$Q_s = f_s \cdot A_s \text{ dan } Q_p = q_p \cdot A_p$$

Nilai (q_p) dan (f_s) ditentukan berdasarkan nilai N-SPT yang digunakan dalam pendekatan Luciano Decourt, dengan mempertimbangkan zona pengaruh di sekitar ujung tiang dan kondisi tanah sepanjang tiang. Dengan demikian, setiap metode menggunakan korelasi N-SPT sesuai formulasi masing-masing sehingga nilai daya dukung ujung dan selimut yang diperoleh dapat dibandingkan secara konsisten.

2.4 Analisis Penurunan Fondasi

Analisis penurunan dilakukan menggunakan metode Fellenius (1999) dan Vesic (1977). Perhitungan penurunan digunakan untuk mengevaluasi deformasi aksial fondasi akibat pembebanan. Pada metode Vesic, penurunan total tiang merupakan kombinasi antara pemendekan elastis tiang dan deformasi tanah akibat tahanan selimut serta tahanan ujung. Secara umum, penurunan total dinyatakan sebagai:

$$S = S_p + S_s + S_b \quad (7)$$

Keterangan:

S : Penurunan total

S_p : Pemendekan elastis tiang

S_s : Penurunan akibat deformasi tanah sepanjang selimut tiang

S_b : Penurunan akibat deformasi tanah di sekitar ujung tiang

Perhitungan penurunan dilakukan pada tingkat pembebanan yang sama dengan beban yang digunakan sebagai pembanding terhadap hasil Static Load Test (SLT). Hal ini dilakukan agar perbandingan penurunan antara metode analitis, pemodelan numerik, dan pengujian lapangan berada pada kondisi pembebanan yang setara.

2.5 Pemodelan Numerik PLAXIS 2D

Analisis numerik dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan PLAXIS 2D untuk memperoleh respons fondasi terhadap pembebanan, khususnya hubungan beban–penurunan dan distribusi tahanan pada sepanjang tiang. Fondasi dimodelkan sebagai fondasi tiang tunggal dan kondisi

tanah direpresentasikan berdasarkan data penyelidikan BH-02. Pemodelan menggunakan kondisi axisymmetric karena geometri fondasi berbentuk silinder dan objek yang dianalisis merupakan tiang tunggal. Elemen yang digunakan terdiri atas 15 nodal untuk memperoleh representasi numerik yang lebih akurat. Stratifikasi tanah dibuat berdasarkan data *bore hole*. Dalam pemodelan pada tesis, domain tanah dibuat dengan lebar 10 m dan kedalaman 18 m. Lapisan tanah yang memiliki karakteristik serupa digeneralisasi menjadi satu lapisan untuk menyederhanakan model dan mengurangi waktu komputasi.

Model material tanah yang digunakan pada bagian pemodelan PLAXIS dalam tesis adalah Hardening Soil (HS). Model ini dipilih karena mampu merepresentasikan hubungan nonlinier antara tegangan dan regangan serta perubahan kekakuan tanah akibat pembebanan. Tipe drainase ditentukan berdasarkan karakteristik tanah yaitu *undrained* untuk tanah lempung dan *drained* untuk tanah pasir. Interaksi antara tanah dan tiang dimodelkan menggunakan *soil and interface*. Tiang direpresentasikan sebagai elemen struktur dan diberikan garis *interface* sebagai zona kontak antara material tanah dan permukaan tiang. Mesh pada model dihasilkan menggunakan tingkat medium. Pemilihan mesh medium dilakukan karena analisis difokuskan pada daya dukung dan penurunan fondasi bukan pada evaluasi tegangan mikro yang memerlukan mesh lebih halus. Kondisi muka air tanah dimodelkan pada kedalaman 4 m dari permukaan tanah berdasarkan data penyelidikan tanah.

Pembebanan aksial diberikan pada kepala tiang menggunakan *line load*. Beban aksial dikonversi menjadi *line load* berdasarkan luas penampang tiang. Titik *node* dan *stress point* ditempatkan pada kepala tiang untuk memperoleh respons deformasi atau penurunan kepala tiang selama proses pembebanan. Kapasitas ultimit dalam analisis PLAXIS ditentukan berdasarkan respons beban–penurunan. Karena PLAXIS menghasilkan respons deformasi berdasarkan simulasi pembebanan, kapasitas ultimit ditentukan menggunakan kriteria penurunan sebesar 10% diameter tiang. Mengacu pada Tomlinson (1977), ketika tahanan tanah telah termobilisasi sepenuhnya maka beban yang menghasilkan penurunan kepala tiang sebesar 10% diameter digunakan sebagai batas kapasitas ultimit. Untuk diameter tiang 1,20 m batas tersebut adalah 120 mm.

2.6 Pengujian PDA/CAPWAP

Hasil pengujian PDA/CAPWAP digunakan sebagai data pembanding terhadap kapasitas dan respons fondasi hasil analisis. Pengujian dilakukan pada tiang nomor 1C BP37 pada 20 Oktober 2020. Tiang yang diuji merupakan *bored pile* berdiameter 1.200 mm dengan panjang total 29,2 m dan panjang penetrasi 27, 2 m. Pengujian menggunakan *drop hammer* dengan berat 15 ton. Hasil pengukuran PDA menunjukkan RMX sebesar 1.155 ton, RSU sebesar 985 ton, EMX sebesar 6,97 ton.m, ETR sebesar 15,5%, FMS sebesar 1.830 ton, CSI sebesar 24,4 MPa, CSX sebesar 15,9 MPa, TSX sebesar 4,4 MPa, DFN sebesar 1 mm, DMX sebesar 5 mm, LP sebesar 27,2 m, dan BTA sebesar 100%. Hasil analisis CAPWAP menghasilkan kapasitas dukung sebesar 1.189,98 ton, yang terdiri atas tahanan gesek sebesar 620 ton dan tahanan ujung sebesar 570 ton dengan penurunan sebesar 13,4 mm.

2.7 Static Loading Test

Static Loading Test (SLT) digunakan sebagai salah satu acuan hasil pengujian lapangan dalam evaluasi kapasitas dan penurunan fondasi. Hasil SLT yang digunakan dalam penelitian menunjukkan kapasitas ultimit sebesar 1.911 ton. Perbandingan hasil analisis dengan SLT dilakukan untuk mengevaluasi perbedaan kapasitas yang diperoleh dari pendekatan empiris dan numerik. Dalam analisis penurunan, nilai penurunan tidak dibandingkan hanya berdasarkan besar deformasinya tetapi harus dikaitkan dengan tingkat pembebanan yang menghasilkan deformasi tersebut. Oleh karena itu, beban pada saat pengukuran penurunan perlu dicantumkan secara eksplisit pada tabel atau kurva perbandingan agar hasil Fellenius, Vesic, PLAXIS, dan SLT dapat dibandingkan pada kondisi pembebanan yang sama.

2.8 Analisis Presentase Deviasi

Evaluasi hasil dilakukan dengan membandingkan kapasitas hasil metode analitis terhadap hasil PDA/CAPWAP dan SLT. Perbandingan dilakukan secara terpisah terhadap kedua hasil pengujian karena keduanya merupakan pengujian dengan mekanisme pembebanan yang berbeda. Persentase deviasi kapasitas terhadap hasil pengujian dihitung menggunakan:

$$\text{Deviasi (\%)} = \frac{Q_{\text{analisis}} - Q_{\text{uji}}}{Q_{\text{uji}}} \times 100\% \quad (8)$$

Dengan Q_{analisis} adalah kapasitas hasil metode analitis dan Q_{uji} adalah kapasitas hasil pengujian yang digunakan sebagai acuan. Perhitungan dilakukan terhadap PDA/CAPWAP dan SLT secara terpisah. Untuk penurunan, persentase deviasi terhadap SLT dihitung dengan:

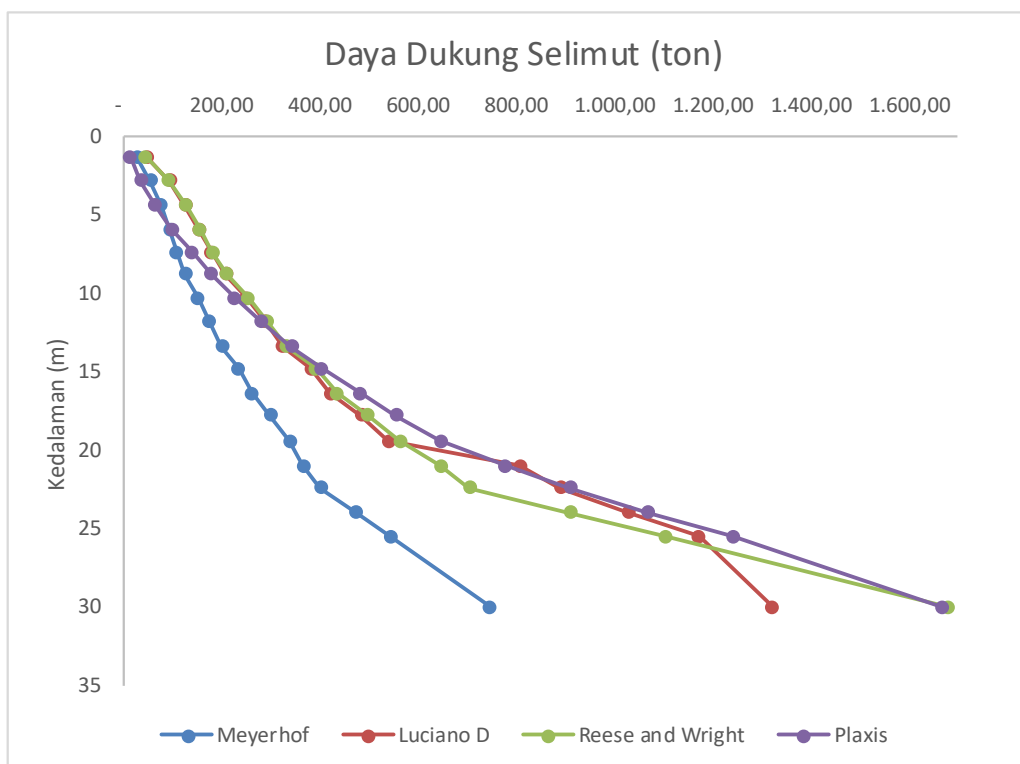
$$\text{Deviasi (\%)} = \frac{S_{\text{analisis}} - S_{\text{SLT}}}{S_{\text{SLT}}} \times 100\% \quad (9)$$

Dengan S_{analisis} adalah settlement hasil metode analisis dan S_{SLT} adalah settlement hasil Static Loading Test. Nilai deviasi digunakan untuk menunjukkan tingkat kedekatan relatif antara hasil analisis dan hasil pengujian. Semakin kecil nilai deviasi, semakin kecil perbedaan relatif hasil analisis terhadap hasil pengujian. Hasil perhitungan kemudian disajikan dalam tabel untuk membandingkan kapasitas, settlement, dan persentase deviasi setiap metode secara sistematis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Tahanan Selimut Fondasi Bored Pile

Hasil analisis menunjukkan bahwa tahanan selimut meningkat seiring bertambahnya kedalaman tiang. Peningkatan lebih nyata terlihat pada kedalaman sekitar 21–30 m. Pada kedalaman sekitar 27 m, tahanan selimut yang diperoleh dari metode Reese & Wright sebesar 1.679 ton, sedangkan hasil pemodelan PLAXIS 2D sebesar 1.666 ton. Selisih kedua hasil tersebut sebesar 13 ton atau sekitar 0,77% terhadap hasil Reese & Wright. Gambar 3 menunjukkan hubungan antara kedalaman tiang dan tahanan selimut yang diperoleh dari metode Meyerhof, Luciano Decourt, Reese & Wright, dan PLAXIS 2D.



Gambar 3. Daya Dukung Selimut vs Kedalaman

Gambar 3 menunjukkan bahwa Peningkatan tahanan selimut menunjukkan bahwa kontribusi gesekan tidak hanya dipengaruhi oleh panjang permukaan kontak tiang–tanah, tetapi juga oleh karakteristik lapisan tanah yang dilalui tiang. Pada kedalaman 21–30 m terjadi peningkatan tahanan yang lebih besar

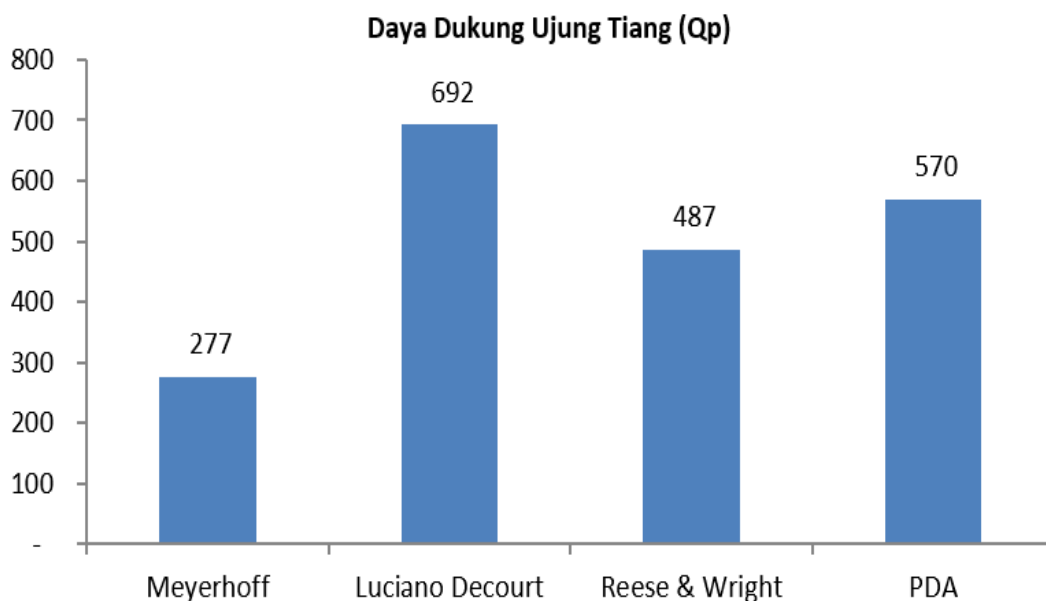
seiring dengan peningkatan nilai N-SPT. Kondisi ini menunjukkan bahwa distribusi parameter tanah sepanjang badan tiang berperan terhadap akumulasi tahanan selimut. Hasil tersebut sejalan dengan [16] yang menunjukkan bahwa evaluasi kapasitas bored pile berbasis data SPT perlu mempertimbangkan variasi kondisi tanah sepanjang kedalaman tiang.

Kedekatan hasil Reese & Wright dan PLAXIS 2D pada kedalaman sekitar 27 m menunjukkan bahwa kedua pendekatan memberikan kecenderungan hasil yang hampir sama pada lokasi penelitian. Namun mekanisme perhitungannya berbeda. Metode Reese & Wright menggunakan korelasi empiris berbasis N-SPT, sedangkan PLAXIS 2D menghitung respons berdasarkan parameter material tanah dan interaksi tanah tiang. Pemodelan PLAXIS dapat digunakan untuk mengevaluasi daya dukung bored pile dengan mempertimbangkan parameter tanah dalam model numerik [17].

Berdasarkan hasil tersebut, distribusi N-SPT sepanjang badan tiang menjadi salah satu parameter yang memengaruhi tahanan selimut. Pengaruhnya bersifat kumulatif karena tahanan dari setiap lapisan tanah berkontribusi terhadap kapasitas selimut total. Hal ini diperkuat oleh [18] yang menunjukkan bahwa tahanan selimut bored pile berkaitan dengan karakteristik tanah dan kondisi sepanjang permukaan kontak tiang tanah.

3.2 Tahanan Ujung Fondasi Bored Pile

Tahanan ujung dievaluasi pada kedalaman sekitar 29 m. Hasil analisis menunjukkan bahwa metode Meyerhof menghasilkan tahanan ujung sebesar 277 ton, Luciano Decourt sebesar 692 ton, dan Reese & Wright sebesar 487 ton, sedangkan hasil PDA/CAPWAP sebesar 570 ton. Gambar 4 menunjukkan perbandingan nilai tahanan ujung (Q_p) yang diperoleh dari metode Meyerhof, Luciano Decourt, Reese & Wright, dan PDA/CAPWAP pada kedalaman sekitar 29 m.



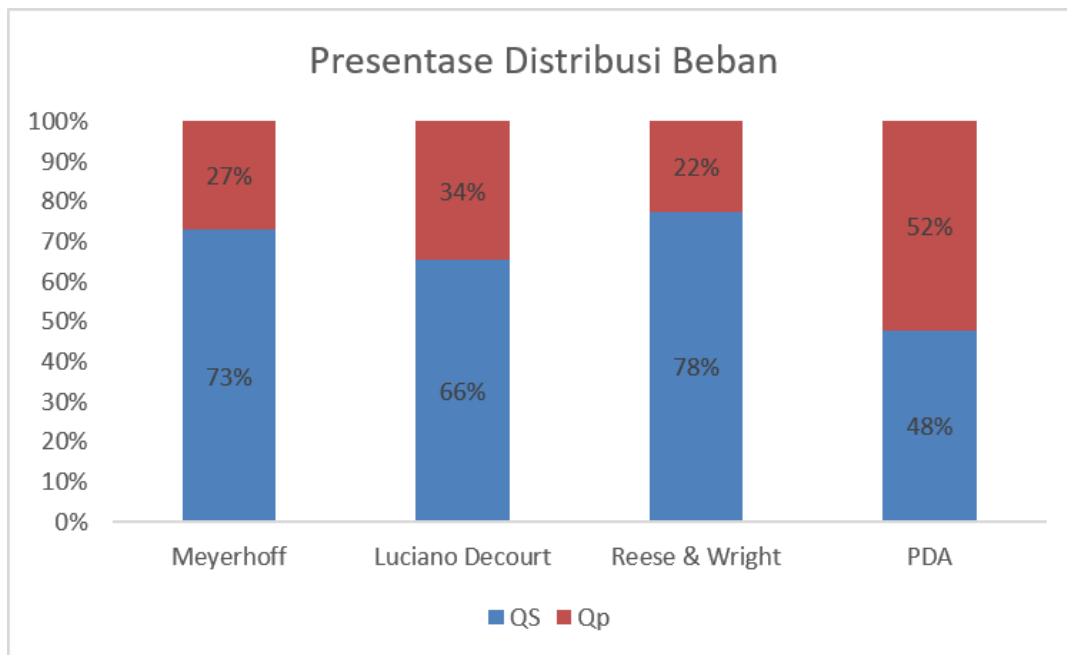
Gambar 4. Nilai Daya Dukung Ujung Tiang (Q_p)

Perbedaan tahanan ujung terlihat lebih besar dibandingkan tahanan selimut. Luciano Decourt menghasilkan nilai tertinggi sebesar 692 ton, sedangkan Meyerhof menghasilkan nilai terendah sebesar 277 ton. Jika dibandingkan dengan tahanan ujung PDA/CAPWAP sebesar 570 ton, selisih Luciano Decourt sebesar 122 ton atau 21,40%, Reese & Wright sebesar 83 ton atau 14,56%, dan Meyerhof sebesar 293 ton atau 51,40%.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa nilai N-SPT pada zona ujung merupakan parameter yang sangat berpengaruh terhadap estimasi tahanan ujung. Pada metode Luciano Decourt, penggunaan nilai N-SPT

representatif di sekitar zona ujung menghasilkan tahanan ujung yang lebih tinggi. Kondisi tersebut sesuai dengan hasil penelitian lain yang menunjukkan bahwa karakteristik tanah pada zona dasar tiang mempunyai pengaruh terhadap besarnya base resistance pada fondasi tiang [19].

Hasil pada penelitian ini juga menunjukkan bahwa penggunaan parameter N-SPT yang sama dapat menghasilkan nilai tahanan ujung berbeda karena setiap metode mempunyai formulasi dan cara menentukan nilai representatif yang berbeda. Dengan demikian, perbedaan nilai Q_p dapat dijelaskan lebih spesifik melalui sensitivitas terhadap N-SPT pada zona ujung, bukan hanya karena setiap metode mempunyai asumsi yang berbeda. Gambar 5 berikut menunjukkan distribusi kontribusi tahanan selimut dan tahanan ujung terhadap kapasitas aksial fondasi berdasarkan hasil analisis dan pengujian.



Gambar 5. Persentase Distribusi Beban

Distribusi kontribusi tahanan ujung terhadap kapasitas total menunjukkan sekitar 27% pada metode Meyerhof, sekitar 34% pada Luciano Decourt dan Reese & Wright, serta sekitar 48% berdasarkan PDA/CAPWAP. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kontribusi tahanan selimut masih menjadi komponen penting dalam mekanisme transfer beban fondasi. Dominasi tahanan selimut juga menunjukkan bahwa karakteristik lapisan tanah sepanjang badan tiang perlu dipertimbangkan bersama kondisi tanah pada zona ujung. Temuan tersebut sejalan dengan penelitian [20] yang membandingkan kapasitas bored pile berdasarkan data SPT dan loading test serta menunjukkan bahwa perbedaan metode dapat menghasilkan variasi kapasitas yang perlu dievaluasi terhadap hasil pengujian lapangan.

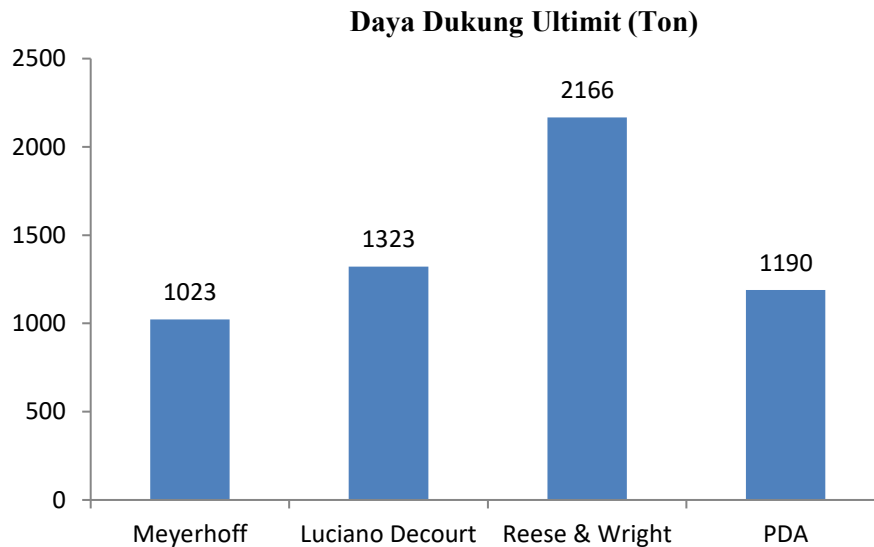
3.3 Kapasitas Ultimit

Kapasitas ultimit merupakan gabungan tahanan selimut dan tahanan ujung yang secara umum dapat dinyatakan sebagai:

$$Q_{ult} = Q_s + Q_p \quad (10)$$

Hasil analisis menunjukkan kapasitas ultimit metode Meyerhof sebesar 1.023 ton, Luciano Decourt sebesar 1.323 ton, Reese & Wright sebesar 2.166 ton, dan PLAXIS 2D sebesar 1.790 ton. Hasil pengujian PDA/CAPWAP sebesar 1.189,98 ton, sedangkan Static Loading Test (SLT) sebesar 1.911

ton. Gambar 6 menunjukkan perbandingan kapasitas ultimit (Qult) yang diperoleh dari metode Meyerhof, Luciano Decourt, Reese & Wright, PLAXIS 2D, PDA/CAPWAP, dan SLT.



Gambar 6. Perbandingan Daya Dukung Ultimate (Qult)

Untuk menjawab komentar reviewer mengenai analisis error secara sistematis, persentase deviasi dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Deviasi (\%)} = \frac{Q_{\text{analisis}} - Q_{\text{uji}}}{Q_{\text{uji}}} \times 100\% \quad (11)$$

Nilai deviasi dihitung terhadap dua hasil pengujian lapangan, yaitu PDA/CAPWAP dan SLT. Hasil perbandingan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan kapasitas daya dukung dan persentase deviasi

Metode	Qult (ton)	Deviasi terhadap PDA/CAPWAP (%)	Peringkat kedekatan terhadap PDA	Deviasi terhadap SLT (%)	Peringkat kedekatan terhadap SLT
Meyerhof	1.023	14,03	2	46,47	4
Luciano Decourt	1.323	11,18	1	30,77	3
Reese & Wright	2.166	82,02	4	13,34	2
PLAXIS 2D	1.790	50,42	3	6,33	1
PDA/CAPWAP	1.189,98	—	—	—	—
SLT	1.911	—	—	—	—

Sumber: Hasil Analisis, 2026.

Tabel 1 menunjukkan secara kuantitatif bahwa kedekatan hasil analisis berubah bergantung pada hasil pengujian yang digunakan sebagai pembanding. Terhadap PDA/CAPWAP, Luciano Decourt memiliki deviasi terkecil sebesar 11,18%, diikuti Meyerhof sebesar 14,03%, PLAXIS 2D sebesar 50,42%, dan Reese & Wright sebesar 82,02%. Sementara itu, terhadap SLT, PLAXIS 2D memiliki deviasi terkecil sebesar 6,33%, diikuti Reese & Wright sebesar 13,34%, Luciano Decourt sebesar 30,77%, dan Meyerhof sebesar 46,47%.

Hasil tersebut berbeda dengan uraian sebelumnya dalam naskah yang menyatakan bahwa Meyerhof merupakan metode yang paling dekat dengan PDA. Berdasarkan perhitungan deviasi menggunakan nilai PDA/CAPWAP sebesar 1.189,98 ton, Luciano Decourt justru mempunyai deviasi lebih kecil, yaitu 11,18% sedangkan Meyerhof sebesar 14,03%. Oleh karena itu, interpretasi hasil pada bagian ini telah diselaraskan berdasarkan perhitungan kuantitatif.

Perbedaan antara hasil PDA/CAPWAP dan SLT juga perlu dipertimbangkan dalam interpretasi. PDA/CAPWAP pada penelitian ini menghasilkan kapasitas 1.189,98 ton sedangkan SLT menghasilkan 1.911 ton. PDA merupakan pengujian dinamik yang menginterpretasikan respons tiang berdasarkan gelombang akibat pembebanan, sedangkan SLT memberikan respons terhadap pembebanan statik. [12] juga menggunakan perbandingan data N-SPT dan PDA dalam evaluasi kapasitas bored pile sedangkan [21] membandingkan hasil pengujian statik dan dinamik dengan hasil analitis pada bored pile. Hasil PLAXIS 2D sebesar 1.790 ton memiliki selisih 121 ton terhadap SLT sehingga menghasilkan deviasi sebesar 6,33%. Berdasarkan pemodelan, tahanan selimut PLAXIS sekitar 1.666 ton dan tahanan ujung sekitar 123,5 ton. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kapasitas yang diperoleh dari pemodelan numerik lebih banyak berasal dari interaksi sepanjang badan tiang.

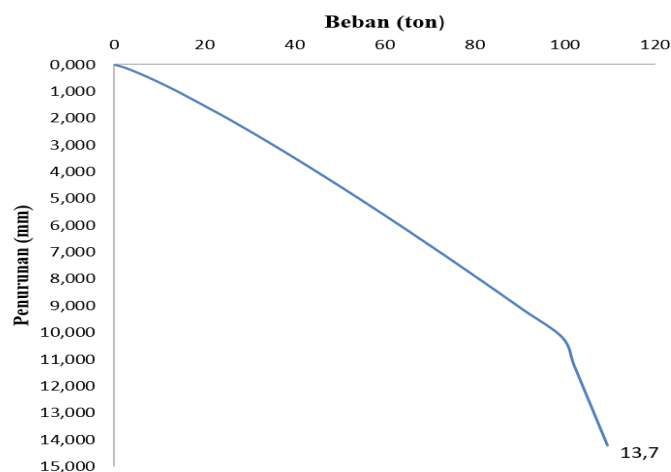
Perbedaan kapasitas antarmetode selanjutnya dapat dikaitkan dengan dua kelompok parameter utama, yaitu distribusi N-SPT sepanjang badan tiang dan N-SPT pada zona ujung. Distribusi N-SPT sepanjang badan tiang memengaruhi akumulasi Q_s sedangkan N-SPT pada zona ujung memengaruhi Q_p . Hal ini sejalan dengan kajian mengenai shaft resistance dan base resistance bored pile yang menunjukkan bahwa karakteristik tanah pada bagian selimut dan zona ujung memberikan kontribusi berbeda terhadap kapasitas fondasi [21], [22]. Dengan demikian, evaluasi kapasitas tidak hanya didasarkan pada nilai Q_{ult} terbesar atau terkecil tetapi juga pada selisih dan persentase deviasi terhadap hasil pengujian. Pendekatan tersebut memberikan dasar kuantitatif untuk membandingkan hasil analisis dan mengurangi interpretasi yang hanya bersifat deskriptif.

3.4 Analisis Penurunan Fondasi

Analisis penurunan dilakukan menggunakan metode Fellenius, Vesic, dan PLAXIS 2D. Hasil analisis dibandingkan dengan settlement sebesar 13,40 mm yang digunakan sebagai nilai pembanding lapangan dalam penelitian ini. Perbandingan hasil analisis dan pengujian lapangan diperlukan karena kapasitas fondasi tidak hanya berkaitan dengan kemampuan menahan beban tetapi juga dengan deformasi yang terjadi. Pendekatan perbandingan antara analisis teoritis, numerik, dan pengujian lapangan juga digunakan dalam penelitian bored pile sebelumnya [15], [20].

3.4.1 Penurunan Metode Fellenius

Hasil analisis Fellenius menunjukkan bahwa penurunan meningkat seiring dengan peningkatan beban. Hasil perhitungan memberikan settlement sebesar 14,22 mm.



Gambar 7. Penurunan Metode Fellenius (1999)

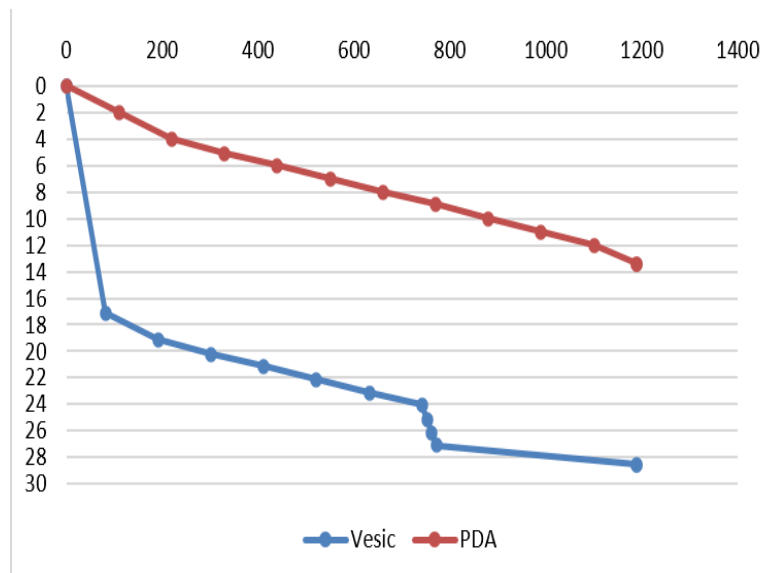
Jika dibandingkan dengan settlement sebesar 13,40 mm, selisih hasil Fellenius adalah 0,82 mm. Persentase deviasi dihitung sebagai:

$$\text{Deviasi (\%)} = \frac{14,22 - 13,40}{13,40} \times 100\% = 6,12 \%$$

Dengan demikian, hasil Fellenius mempunyai deviasi sebesar 6,12%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa hasil perhitungan Fellenius memiliki kedekatan numerik yang relatif tinggi terhadap nilai settlement pembanding pada kondisi penelitian ini. Hasil serupa juga dilaporkan dalam penelitian terdahulu yang membandingkan penurunan bored pile berdasarkan pendekatan analitis dan pengujian lapangan [23].

3.4.2 Penurunan Metode Vesic

Metode Vesic digunakan untuk menghitung penurunan elastis fondasi berdasarkan komponen deformasi tiang dan tanah. Hasil analisis menunjukkan settlement sebesar 23,47 mm. Gambar 8 menunjukkan hasil perhitungan penurunan fondasi berdasarkan metode Vesic pada kondisi pembebanan penelitian.



Gambar 8. Penurunan Metode Vesic (1977)

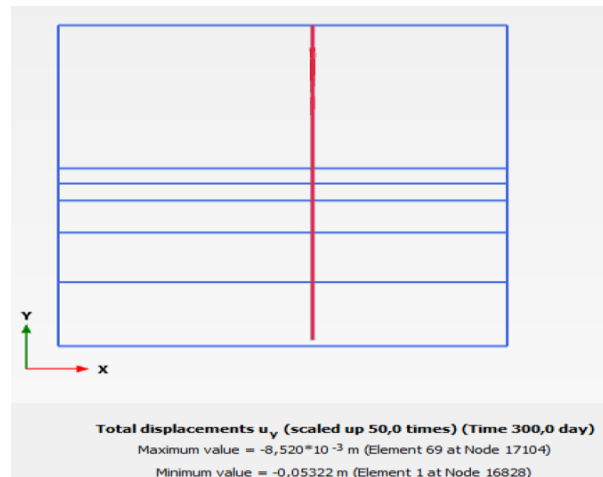
Jika dibandingkan dengan settlement 13,40 mm, selisih yang diperoleh sebesar 10,07 mm dengan deviasi:

$$\text{Deviasi (\%)} = \frac{23,47 - 13,40}{13,40} \times 100\% = 75,15 \%$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa estimasi Vesic lebih tinggi dibandingkan nilai settlement pembanding. Perbedaan tersebut dapat berkaitan dengan parameter deformasi tanah dan komponen penurunan yang digunakan dalam pendekatan analitis. Oleh karena itu, nilai settlement perlu diinterpretasikan bersama kondisi tanah dan tingkat pembebanan yang digunakan dalam perhitungan.

3.4.3 Penurunan Berdasarkan PLAXIS 2D

Pemodelan PLAXIS 2D digunakan untuk memperoleh respons deformasi fondasi berdasarkan metode elemen hingga. Model mempertimbangkan kondisi lapisan tanah, parameter material, kondisi drainase, dan interaksi tanah–tiang sebagaimana dijelaskan pada metode penelitian. Pendekatan elemen hingga banyak digunakan untuk mengevaluasi respons daya dukung dan penurunan bored pile karena dapat merepresentasikan interaksi tanah dan fondasi secara numerik [15], [17]. Gambar 10 menunjukkan hasil pemodelan PLAXIS 2D berupa respons penurunan fondasi terhadap pembebanan yang diberikan.



Gambar 9. Penurunan Dalam Metode Elemen Hingga (PLAXIS 2D)

Hasil pemodelan menunjukkan settlement sebesar 23,70 mm. Nilai tersebut sangat dekat dengan hasil Vesic sebesar 23,47 mm, dengan selisih hanya 0,23 mm. Namun, jika dibandingkan dengan settlement pembanding sebesar 13,40 mm, selisih PLAXIS 2D sebesar 10,30 mm atau deviasi sebesar:

$$\text{Deviasi (\%)} = \frac{23,47 - 13,40}{13,40} \times 100\% = 75,15 \%$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa settlement hasil PLAXIS 2D lebih besar daripada nilai pembanding lapangan. Perbedaan tersebut perlu dikaitkan dengan parameter material tanah, kekakuan tanah, kondisi drainase, serta interaksi tanah tiang yang digunakan dalam pemodelan. [17] menunjukkan bahwa hasil pemodelan PLAXIS untuk bored pile sangat dipengaruhi oleh parameter yang digunakan dalam pemodelan numerik.

3.5 Perbandingan Settlement dan Persentase Deviasi

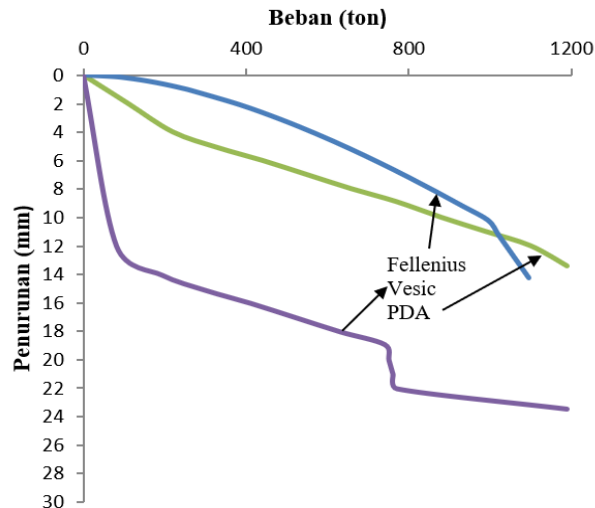
Untuk memenuhi permintaan reviewer mengenai analisis error secara sistematis, hasil settlement dibandingkan berdasarkan selisih absolut dan persentase deviasi terhadap nilai settlement pembanding. Hasilnya disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan settlement terhadap hasil pengujian

Metode	Settlement (mm)	Selisih terhadap pembanding (mm)	Deviasi (%)	Peringkat kedekatan
Fellenius	14,22	0,82	6,12	1
Vesic	23,47	10,07	75,15	2
PLAXIS 2D	23,70	10,30	76,87	3
Pembanding lapangan	13,40	—	—	—

Sumber: Hasil Analisis, 2026.

Berdasarkan Tabel 2, Fellenius menghasilkan deviasi terkecil sebesar 6,12%, sedangkan Vesic dan PLAXIS 2D masing-masing menghasilkan deviasi sebesar 75,15% dan 76,87%. Peringkat pada tabel menunjukkan kedekatan numerik terhadap nilai pembanding pada kasus penelitian ini, bukan ukuran akurasi universal suatu metode. Gambar 11 menunjukkan perbandingan hasil settlement metode Vesic dan Fellenius terhadap respons penurunan fondasi yang diperoleh dalam penelitian.



Gambar 10. Penurunan Metode Analisis Vesic (1977) dan Metode Fellenius (1999)

3.6 Evaluasi Kesesuaian Hasil Analisis terhadap Pengujian Lapangan

Evaluasi akhir dilakukan dengan menggabungkan hasil kapasitas daya dukung dan settlement. Kapasitas dibandingkan terhadap PDA/CAPWAP dan SLT, sedangkan settlement dibandingkan terhadap nilai settlement lapangan sebesar 13,40 mm.

Tabel 3. Rekapitulasi hasil analisis dan persentase deviasi

Metode	Qult (ton)	Deviasi PDA/CAPWAP (%)	Deviasi SLT (%)	Settlement (mm)	Deviasi Settlement (%)
Meyerhof	1.023	14,03	46,47	—	—
Luciano Decourt	1.323	11,18	30,77	—	—
Reese & Wright	2.166	82,02	13,34	—	—
PLAXIS 2D	1.790	50,42	6,33	23,70	76,87
Fellenius	—	—	—	14,22	6,12
Vesic	—	—	—	23,47	75,15
PDA/CAPWAP	1.189,98	—	—	13,40*	—
SLT	1.911	—	—	13,40	—

Sumber: Hasil Analisis, 2026.

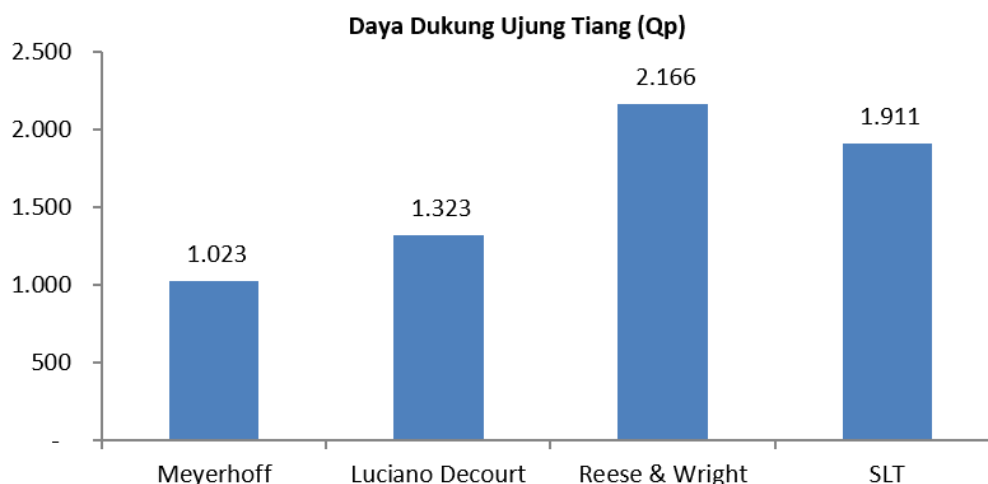
Tabel 3 memperlihatkan bahwa kedekatan hasil analisis berbeda berdasarkan parameter dan pengujian pembanding. Untuk kapasitas, Luciano Decourt mempunyai deviasi terkecil terhadap PDA/CAPWAP sebesar 11,18% sedangkan PLAXIS 2D mempunyai deviasi terkecil terhadap SLT sebesar 6,33%. Reese & Wright juga menunjukkan deviasi relatif kecil terhadap SLT sebesar 13,34%. Perubahan peringkat tersebut menunjukkan bahwa hasil analisis tidak dapat dievaluasi hanya berdasarkan satu benchmark. [21] menunjukkan pentingnya membandingkan hasil kapasitas bored pile terhadap pengujian statik dan dinamik karena masing-masing pengujian memberikan respons yang berbeda. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa perbandingan hasil SPT dan loading test dapat menghasilkan variasi estimasi daya dukung yang perlu diinterpretasikan berdasarkan kondisi tanah dan metode yang digunakan [20].

Pada aspek settlement, Fellenius mempunyai deviasi sebesar 6,12%, sedangkan Vesic dan PLAXIS 2D masing-masing sebesar 75,15% dan 76,87%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai settlement Fellenius paling dekat secara numerik dengan nilai pembanding pada penelitian ini. Sementara itu, hasil Vesic dan PLAXIS 2D yang hampir sama yaitu 23,47 mm dan 23,70 mm menunjukkan adanya kedekatan respons deformasi antara kedua pendekatan tersebut, meskipun keduanya lebih besar daripada nilai settlement pembanding.

Jika ditinjau dari parameter tanah, hasil penelitian menunjukkan dua mekanisme yang perlu dibedakan. Nilai N-SPT pada zona ujung terutama berpengaruh terhadap estimasi tahanan ujung sedangkan distribusi N-SPT sepanjang badan tiang memengaruhi akumulasi tahanan selimut. Pada PLAXIS 2D, parameter material tanah, kekakuan, kondisi drainase, dan interaksi tanah tiang turut memengaruhi respons kapasitas dan deformasi. Temuan tersebut sejalan dengan penelitian mengenai base resistance dan shaft resistance bored pile yang menunjukkan bahwa kondisi tanah pada zona ujung dan sepanjang badan tiang memberikan pengaruh yang berbeda terhadap kapasitas fondasi [18], [19].

Dengan demikian, pembahasan tidak hanya menunjukkan bahwa hasil antar-metode berbeda, tetapi juga mengidentifikasi sumber perbedaan melalui parameter tanah dan mekanisme transfer beban. N-SPT pada zona ujung berpengaruh terhadap Q_p sedangkan N-SPT sepanjang badan tiang berpengaruh terhadap Q_s . Pada pemodelan numerik, perbedaan hasil settlement berkaitan dengan parameter material dan interaksi tanah tiang. Pendekatan ini memberikan interpretasi yang lebih rinci dibandingkan hanya menyatakan bahwa perbedaan terjadi karena setiap metode mempunyai asumsi yang berbeda.

Secara keseluruhan, evaluasi menggunakan nilai kapasitas, settlement, selisih absolut, dan persentase deviasi memberikan dasar kuantitatif untuk membandingkan hasil analisis. Peringkat yang ditampilkan pada Tabel 1 dan Tabel 2 digunakan untuk menunjukkan kedekatan hasil terhadap benchmark pada kasus penelitian ini, bukan untuk menyatakan bahwa suatu metode mempunyai akurasi yang berlaku secara universal. Pendekatan multi-metode berupa analisis berbasis SPT, pemodelan numerik, serta validasi melalui pengujian lapangan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap perilaku fondasi bored pile [12], [17], [20], [21]. Gambar 12 menunjukkan perbandingan kapasitas ultimit hasil analisis dengan hasil Static Loading Test (SLT) sebagai dasar evaluasi kedekatan hasil masing-masing metode.



Gambar 11. Perbandingan Qult analisis vs SLT

Gambar 11 menunjukkan perbandingan kapasitas ultimit hasil analisis terhadap SLT. PLAXIS 2D menghasilkan 1.790 ton, paling dekat dengan SLT sebesar 1.911 ton dengan deviasi 6,33%. Kedekatan ini menunjukkan bahwa pemodelan numerik mampu merepresentasikan respons kapasitas pada kondisi penelitian meskipun hasil tetap dipengaruhi parameter tanah dan interaksi tanah tiang yang digunakan model [24], [25].

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kedekatan metode berubah berdasarkan benchmark yang digunakan. Kondisi ini juga menunjukkan pentingnya membedakan hasil pengujian dinamik dan statik ketika melakukan evaluasi kapasitas fondasi. Pendekatan berbasis load settlement dan hasil pengujian lapangan dapat digunakan untuk mengevaluasi respons fondasi secara lebih menyeluruh [24].

4 KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas dan penurunan fondasi bored pile pada Proyek Makassar Berdasarkan hasil analisis daya dukung dan penurunan fondasi bored pile pada Proyek Makassar New Port diperoleh perbedaan kapasitas ultimit antar metode yang dipengaruhi oleh pendekatan perhitungan dan parameter tanah yang digunakan. Metode Meyerhof menghasilkan kapasitas ultimit sebesar 1.023 ton, Luciano Decourt sebesar 1.323 ton, Reese & Wright sebesar 2.166 ton sedangkan PLAXIS 2D menghasilkan 1.790 ton. Jika dibandingkan dengan hasil PDA/CAPWAP sebesar 1.189,98 ton, metode Luciano Decourt memiliki deviasi terkecil sebesar 11,18% sedangkan terhadap hasil SLT sebesar 1.911 ton, PLAXIS 2D menunjukkan deviasi terkecil sebesar 6,33%. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa respons daya dukung dipengaruhi oleh kontribusi tahanan selimut, tahanan ujung, serta karakteristik tanah berdasarkan nilai N-SPT pada setiap lapisan. Pada analisis penurunan, metode Fellenius menghasilkan settlement sebesar 14,22 mm, Vesic sebesar 23,47 mm, dan PLAXIS 2D sebesar 23,70 mm, sedangkan hasil SLT sebesar 13,40 mm. Fellenius memberikan deviasi terkecil terhadap SLT yaitu 6,12%. Dengan demikian, hasil analisis menunjukkan bahwa tidak terdapat satu metode yang menghasilkan nilai paling dekat terhadap seluruh data pengujian. Pemilihan metode perlu mempertimbangkan karakteristik tanah, parameter input, mekanisme transfer beban, serta tujuan evaluasi kapasitas dan penurunan fondasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. K. H. Yan Chun Chen, "Impacts Of Liner Shipping Connectivity And Global Competitiveness On Logistics Performance: The Mediating Role Of The Quality Of Port And Infrastructure," *Transport*, vol. 38, no. 2, pp. 87–104, 2023.
- [2] E. D. Lazarus, "Rapid seaward expansion of seaport footprints worldwide," *Commun. earth enviroment*, no. 2023, pp. 1–8, 2020, doi: 10.1038/s43247-023-01110-y.
- [3] R. S. Reska Dwi Puspita, Goldie Melinda Wijayanti, "Strategi Penyediaan Infrastruktur Berbasis Green Port Di Pelabuhan Panjang Kota Bandarlampung," *Reka Ruang*, vol. 7, no. 1, pp. 66–76, 2025.
- [4] A. W. W. S. Azwar Alief Lazuardhi, Suwanto Marsudi, "Perencanaan Struktur Bangunan Mooring Dolphin dengan Kapasitas 5000 Grt pada Dermaga I Pelabuhan Bolok Kabupaten," *J. Teknol. dan Rekayasa Sumber Daya Air*, vol. 6, no. 1, pp. 171–185, 2026.
- [5] A. Babul, K. Heriana, E. Sikala, D. T. Kelautan, and U. Hasanuddin, "Strategi Manajemen Risiko Dalam Pemeliharaan Infrastruktur Maritim Untuk Keselamatan Dan Produktivitas," *Sensistek Ris. Sains Dan Teknol. Kelaut.*, vol. 8, no. 2, pp. 89–95, 2025.
- [6] Y. Li, P. Zhu, G. Zhang, and Y. Yu, "Improving Seaport Wharf Maintenance and Safety with Structural Health Monitoring System in High Salt and Humidity Environments," *sustainability*, vol. 15, 2023.
- [7] I. W. E. Darma and D. N. Sugianto, "Pemanfaatan Teknologi Dan Regulasi Reklamasi Ramah Lingkungan (Studi Kasus : Pengembangan Makassar New Port)," *Bul. Oseanografi Mar.*, vol. 12, no. 2, pp. 290–304, 2023, doi: 10.14710/buloma.v12i2.51471.
- [8] L. Caroles, "Analisis Urgensi Pembangunan Hinterland Dry Port Berdasarkan Proyeksi Pertumbuhan Ekonomi Daerah : Studi Kasus Sulawesi Selatan," *KRESNA J. Ris. dan Pengabd. Masy.*, vol. 2, pp. 53–65, 2022.
- [9] R. S. Warman, Y. M. Purwana, and N. Djarwanti, "Profil permukaan tanah keras kota surakarta sebagai informasi pradesain pondasi," *e-Jurnal MATRIKS Tek. SIPIL*, pp. 83–91, 2016.
- [10] R. Ewusi-wilson, J. Park, B. Yoon, and C. Lee, "Geostatistics and Artificial Intelligence Applications for Spatial Evaluation of Bearing Capacity after Dynamic Compaction," *Hindawi Adv. Civ. Eng.*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/7053228.
- [11] N. Zhang, M. Arroyo, M. Oryem, and A. Gens, "Computers and Geotechnics Energy balance analyses during Standard Penetration Tests in a virtual calibration chamber," *Comput. Geotech.*, vol. 133, no. February, p. 104040, 2021, doi: 10.1016/j.compgeo.2021.104040.
- [12] I. Nurdiah, B. Chairullah, and D. Sundary, "Analisis Perbandingan Daya Dukung Pondasi Bored Pile Menggunakan Data N- SPT Dan Hasil PDA Test Pada JOP Proyek Pembangunan Jalan Tol Sigli- Banda Aceh Seksi II," *J. Civ. Eng. Student*, vol. 4, no. 2, pp. 4–10, 2022.

- [13] J. S. Andrey Muhammad Nasution, Darlina Tanjung, “Perbandingan Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Menggunakan Data Sondir Dan SPT Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga Pada Pembangunan Sekolah Teologi Anugerah Misi Kabupaten Nias Barat,” *Konstr. Publ. Ilmu Tek. Perenc. Tata Ruang dan Tek. Sipil*, vol. 2, no. 2, pp. 24–37, 2024.
- [14] T. K. Lohani, M. T. Ayana, A. K. Mohammed, and J. Pattanaik, “Cramming the Specificities in Contemplating Safe Bearing Capacity for the Foundation Assessed from Borehole Samples in a Sandy-Moorum Zone,” *Hindawi Adv. Civ. Eng.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/6642674.
- [15] R. S. Risky Fajar Sundari, Roesyanto, Gina Cynthia Raphita Hasibuan, “Analisis Daya Dukung Aksial Bored Pile Ø 80 Cm Dengan Menggunakan Uji Beban Statik Dan Menggunakan Metode Elemen Hingga Pada Proyek Menara BRI – Medan,” *Syntax Lit. J. Ilm. Indones.*, vol. 9, no. 1, 2024.
- [16] P. Prijasambada *et al.*, “Bearing Capacity and Settlement of Bored Pile Foundation Based on SPT Test Data and CPT Test,” *Proceeding Int. Conf. Multidiscip. Res. Sustain. Innov.*, vol. 1, no. 1, 2024.
- [17] N. S. Rachmah *et al.*, “Pemodelan Menggunakan Software Plaxis Untuk Simulasi Daya Dukung Fondasi Bored Pile,” *Viteks*, vol. 2, no. 2, 2024.
- [18] R. Cesaro, “Shaft resistance of bored piles in sand,” *Acta Geotech.*, vol. 21, no. 5, pp. 3103–3126, 2026, doi: 10.1007/s11440-025-02860-z.
- [19] T. Q. Huynh, “Base resistance of super-large and long piles in soft soil : performance of artificial neural network model and field implications,” *Acta Geotech.*, vol. 18, no. 5, pp. 2755–2775, 2023, doi: 10.1007/s11440-022-01736-w.
- [20] L. Darmiyanti and G. Pribadi, “Perbandingan Daya Dukung Dan Penurunan Bored Pile Berdasarkan Data Spt Dan Loading Test,” *J. Tek. Sipil*, vol. 5, no. 2, 2024.
- [21] R. Kurniadhi, H. C. Hardiyatmo, and F. Faris, “Comparison of Field Ultimate Capacity (Static and Dynamic Load Test) with the Analytic Design of Bored Pile in Granular Soil , Batam , Indonesia,” *J. Tek. SIPIL Perenc.*, vol. 25, no. 2, pp. 211–217, 2023.
- [22] A. Z. Ter-martirosyan, V. V Sidorov, and A. S. Almakaeva, “applied sciences Graph-Analytical Method for Calculating Settlement of a Single Pile Taking into Account Soil Slippage,” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 8064, 2024.
- [23] S. Tahismasari, L. Darmiyanti, and A. P. Rodji, “Analisis Perbandingan Daya Dukung Dan Penurunan Pondasi Bored Pile Berdasarkan Data SPT,” *J. Basement*, vol. 2, no. 2, pp. 141–148, 2024.
- [24] M. Ramdhany and S. Permana, “Analisis Daya Dukung dan Penurunan Pondasi Bored Pile Menggunakan Nilai Standard Penetration Test (SPT) pada Proyek Pembangunan Kereta Cepat Indonesia China,” *J. Konstr.*, vol. 19, no. 1, pp. 212–218, 2021.
- [25] S. Z. Zaen, S. Zaky, A. Putra, and P. Setiyawan, “Technema : Journal of Intelligent Engineering and Computing Analysis of The Effect of The Number And Depth of Bored Pile Groups on The Settlement of Building Foundations in Soft Soil,” *Technema J. Intell. Eng. Comput.*, vol. 1, no. 3, 2026.