

ANALISIS DAYA DUKUNG AKSIAL TIANG DIAMETER 60 CM DENGAN MENGGUNAKAN UJI BEBAN STATIK AKSIAL DAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA PADA PROYEK GEDUNG RAWAT INAP TOWER-1 RS HAJI MEDAN

Mochammad Val Kaisar¹, Roesyanto², Syiril Erwin
Harahap³

¹Teknik Sipil Universitas Sumatera Utara
email valkaisar97@gmail.com, roesyanto@usu.ac.id, syirilerwin@polmed.ac.id

SUBMITTED 17 MEI 2025 REVISED 7 JULI 2025 ACCEPTED 22 JULI 2025

ABSTRACT

Spun pile foundations are the primary solution for the construction of multi-story buildings in areas with unfavorable soil conditions, such as in the city of Medan. This study analyzes the axial bearing capacity and settlement of 60 cm diameter Spun Pile foundations in the Tower-1 Inpatient Building Project at Haji Medan Hospital by comparing three approaches: an empirical method based on SPT data, static load testing, and numerical simulation using PLAXIS 3D with Mohr-Coulomb and Hardening Soil soil models. The analysis results show that the empirical method yields an ultimate bearing capacity of 277.4 tons, while the interpretation of field load tests (Davisson, Mazurkiewicz, and Chin) provides values of 410 tons, 430 tons, and 476 tons, respectively. The PLAXIS 3D simulation showed conservative results with a deviation of less than 6% compared to field data, where the Hardening Soil model (8.053 mm settlement) was more accurate than the Mohr-Coulomb model (10.19 mm) in predicting the actual settlement of 6.66 mm. Additionally, pile group efficiency analysis yielded values of 75–83.34%, indicating the influence of pile-to-pile interaction on bearing capacity. This study concludes that PLAXIS 3D modeling with the Hardening Soil model can provide more realistic predictions for Spun Pile foundation design and serve as a reference for similar projects in regions with similar soil characteristics.

Keywords: Spun pile, axial load capacity, PLAXIS 3D, static load test, SPT, finite element method.

ABSTRAK

Pondasi Spun Pile merupakan solusi utama untuk pembangunan gedung bertingkat di daerah dengan kondisi tanah kurang mendukung, seperti di Kota Medan. Penelitian ini menganalisis daya dukung aksial dan penurunan pondasi Spun Pile berdiameter 60 cm pada Proyek Gedung Rawat Inap Tower-1 RS Haji Medan dengan membandingkan tiga pendekatan, yaitu metode empiris berbasis data SPT, uji pembebanan statis (static load test), dan simulasi numerik menggunakan PLAXIS 3D dengan model tanah Mohr-Coulomb dan Hardening Soil. Hasil analisis menunjukkan bahwa metode empiris menghasilkan daya dukung ultimit sebesar 277,4 ton, sedangkan interpretasi uji pembebanan lapangan (Davisson, Mazurkiewicz, dan Chin) memberikan nilai masing-masing 410 ton, 430 ton, dan 476 ton. Simulasi PLAXIS 3D menunjukkan hasil yang konservatif dengan deviasi kurang dari 6% dibandingkan data lapangan, di mana model Hardening Soil (penurunan 8,053 mm) lebih akurat daripada model Mohr-Coulomb (10,19 mm) dalam memprediksi penurunan aktual sebesar 6,66 mm. Selain itu, analisis efisiensi kelompok tiang menghasilkan nilai 75–83,34%, menunjukkan pengaruh interaksi antar-tiang terhadap kapasitas dukung. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pemodelan PLAXIS 3D dengan model Hardening Soil dapat memberikan prediksi yang lebih realistis untuk perencanaan pondasi Spun Pile dan menjadi acuan bagi proyek sejenis di wilayah dengan karakteristik tanah serupa.

Kata Kunci: Spun pile, daya dukung aksial, PLAXIS 3D, uji pembebanan statis, SPT, metode elemen hingga.

1. PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Perkembangan pembangunan infrastruktur vertikal di Indonesia, khususnya di kota metropolitan seperti Medan, menghadapi tantangan utama berupa kondisi tanah lunak dan keterbatasan lahan. Pondasi dalam seperti spun pile menjadi solusi yang semakin diminati karena efisiensi waktu pemasangan dan kapasitas dukung yang tinggi dibandingkan bored pile. Studi terdahulu menunjukkan bahwa spun pile dengan metode spinning menghasilkan beton berkepadatan tinggi dan homogen, sehingga lebih tahan terhadap beban aksial dan lateral (Hardyatmo, 2010). Namun, akurasi perhitungan daya dukung berbasis data SPT seringkali lebih konservatif dibandingkan hasil uji pembebanan langsung di lapangan (Hutapea, 2021). Penelitian ini mengambil studi kasus proyek Gedung Rawat Inap Tower-1 RS Haji Medan, di mana pondasi spun pile diameter 60 cm dengan kedalaman 22 m diaplikasikan pada tanah lunak hingga sedang. Adanya disparitas antara prediksi teoritis dan perilaku aktual tanah-tiang mendorong perlunya integrasi antara metode empiris, uji lapangan, dan simulasi numerik untuk memvalidasi desain pondasi.

Pemilihan spun pile pada proyek ini didasarkan pada efisiensi waktu dan biaya, serta kinerja struktural yang terbukti di tanah lunak. Studi oleh (Zhang, L., 2021) menunjukkan bahwa spun pile mengurangi biaya konstruksi hingga 30% dibanding bored pile, sementara (Hardiyatmo, 2018) menekankan keunggulan kepadatan betonnya. Selain itu, metode produksi pracetak meminimalkan risiko ketidakstabilan tanah selama pemasangan, yang kritis untuk lokasi padat seperti RS Haji Medan

Lokasi proyek di Medan yang didominasi tanah aluvial lunak (Silitonga, 2017) memerlukan pondasi dalam seperti spun pile untuk menghindari penurunan berlebihan. Karakteristik tanah aluvial di wilayah ini menunjukkan kompresibilitas tinggi dengan indeks pemampatan (C_c) berkisar 0.3-0.5 dan kadar air mencapai 40-60% (Marbun, 2022) yang berpotensi menyebabkan penurunan konsolidasi signifikan jika menggunakan pondasi dangkal. Spun pile dengan panjang 22 m

dipilih untuk menembus lapisan lunak hingga mencapai lapisan pasir padat pada kedalaman 18-22 m yang memiliki nilai N-SPT >20, Keunggulan spun pile dalam mendistribusikan beban secara merata melalui kombinasi tahanan ujung (end-bearing) dan gesekan selimut (skin friction) menjadikannya solusi optimal untuk mengatasi masalah daya dukung tanah lunak sekaligus memenuhi batas toleransi penurunan maksimal 25 mm untuk struktur tinggi (SNI 8460:2017).

2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini menjawab tiga pertanyaan kritis: (1) Berapa besar daya dukung aksial spun pile hasil perhitungan empiris (SPT) dan loading test? (2) Seberapa signifikan perbedaan penurunan elastis tiang tunggal antara metode analitis (Poulos & Davis) dan simulasi PLAXIS 3D? (3) Bagaimana akurasi model tanah Mohr-Coulomb dan Hardening Soil dalam PLAXIS 3D untuk memprediksi respon penurunan berdasarkan data loading test? Permasalahan ini relevan diangkat mengingat terbatasnya studi komparatif yang menguji konsistensi ketiga pendekatan tersebut pada proyek skala riil di Indonesia.

3. Batasan Masalah

Penelitian ini memfokuskan analisis pada: (1) Tiang tunggal spun pile diameter 60 cm dengan panjang 22 m di lokasi BH-2 proyek RS Haji Medan, (2) Parameter tanah yang digunakan berasal dari data SPT dan borelog, serta (3) Simulasi PLAXIS 3D dengan dua model tanah (Mohr-Coulomb dan Hardening Soil) tanpa mempertimbangkan efek dinamis seperti gempa atau vibrasi. Pembatasan ini dilakukan untuk memastikan kedalaman analisis yang terukur tanpa mengabaikan kompleksitas interaksi tanah-struktur.

4. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) Mengevaluasi kapasitas daya dukung ultimit spun pile melalui pendekatan empiris (SPT) dan validasi loading test, (2) Menganalisis kinerja penurunan tiang tunggal dengan membandingkan metode analitis dan numerik, serta (3) Menguji reliabilitas pemodelan PLAXIS 3D dalam mereplikasi hasil uji lapangan. Temuan ini diharapkan dapat menjadi referensi untuk optimasi desain pondasi dalam di wilayah dengan karakteristik tanah serupa, sekaligus mengurangi ketergantungan pada metode trial-and-error yang berbiaya tinggi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Dasar Pondasi Spun Pile

Pondasi spun pile merupakan jenis pondasi dalam pracetak yang diproduksi dengan metode sentrifugasi untuk menghasilkan beton berkepadatan tinggi. Menurut (Hannigan, 2016), spun pile memiliki keunggulan efisiensi waktu pemasangan 40-60% lebih cepat dibanding bored pile karena eliminasi proses pengeboran dan curing di lapangan. Studi oleh (Nugroho, A & Santoso, 2022) dalam mengungkapkan bahwa spun pile produksi lokal Indonesia menunjukkan performa material yang unggul, dengan hasil uji kuat tekan beton mencapai 45–55 MPa, jauh melampaui persyaratan standar SNI 2847:2019 untuk pondasi dalam.

Tabel 1. Perbandingan Spun Pile dan Bored Pile

Parameter	Spun Pile	Bored Pile	Keunggulan Spun Pile
Waktu Pemasangan	1-2 hari/tiang (pracetak)	3-5 hari/tiang (curing in-situ)	50-60% lebih cepat
Kuat Tekan Beton	40-50 MPa (homogen)	25-30 MPa (variasi lapangan)	Kuat Tekan Terjamin
Ketahanan Korosi	Permukaan kedap air	Berporos, risiko karbonatasi	Durabilitas lebih baik di tanah organik
Gangguan Lingkungan	Minim getaran dan noise	Getaran tinggi saat pengeboran	Cocok untuk area perkotaan padat
Kontrol Kualitas	Produksi pabrik terkontrol	Bergantung kondisi lapangan	Konsistensi material terjamin

Sumber : Analisis penulis berdasarkan referensi yang dikutip

2.2 Daya Dukung Aksial Tiang

Beban yang akan diujikan sebesar 200% dari beban perencanaan dan dilaksanakan dengan penambahan 25% dari beban perencanaan, kecuali jika terjadi keruntuhan sebelum beban tersebut tercapai. Penambahan beban dilakukan

apabila kecepatan penurunan yang terjadi tidak lebih besar dari 0,01 in/hour atau 0,25 mm/jam tetapi tidak lebih lama dari 2 jam. Apabila tidak terjadi keruntuhan maka total beban yang telah diberikan dapat diangkat kembali (*unloading*) setelah 12 jam didiamkan jika penurunan yang terjadi pada 1 jam terakhir tidak besar dari pada 0,01 in (0,25 mm). penurunan yang terjadi masih lebih besar dari pada 0,01 in (25 mm) maka biarkan beban selama 24 jam.

Tabel 2.1 Cyclic loading procedur loading-unloading

Cyclie	Loading			Procedur loading-unloading						
Cyclic 1	0%	25%	50%	25%	0%					
Cyclic 2	0%	50%	75%	100%	75%	50%	0%			
Cyclic 3	0%	50%	200%	125%	150%	125%	100%	50%	0%	
Cyclic 4	0%	50%	100%	150%	175%	200%	150%	100%	50%	0%

Sumber : (ASTM D1143)

2.3 Interpretasi Loading Test

Metode Davisson, Chin, dan Mazurkiewicz dipilih untuk interpretasi hasil uji pembebanan spun pile karena memberikan pendekatan komplementer: Davisson (metode offset) menjadi dasar konservatif sesuai standar ASTM D1143, Chin (metode ekstrapolasi) mengevaluasi kapasitas ultimit melalui analisis regresi linier, sedangkan Mazurkiewicz (metode grafis) mengidentifikasi beban runtuh secara visual pada kurva non-linier (Fellenius, 2020). Pemilihan ketiganya memastikan validasi holistik, di mana Davisson menjamin keamanan struktur, Chin mengestimasi potensi maksimum teoritis, dan Mazurkiewicz berfungsi sebagai pembanding objektif untuk hasil yang lebih andal. Berikut adalah rumus dari interpretasi Metode Davisson, Metode Chin dan Metode Mazurkiewich:

a. Metode Davisson

$$\Delta cr = (0,15) + \frac{D}{120} inch$$

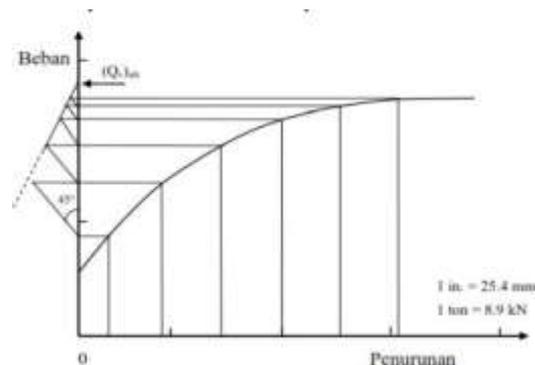
b. Metode Chin

$$S/Q = C_1S + C_2$$

c. Metode Mazurkiewich

Interpretasi tes pembebanan dengan metode Mazurkiewicz diawali dengan memplot kurva beban-penurunan, kemudian menarik garis vertikal dari titik-titik

penurunan tertentu yang memotong kurva, dilanjutkan dengan menggambar garis horizontal ke sumbu beban. Dari titik potong tersebut, ditarik garis 45° hingga memotong garis beban berikutnya, di mana serangkaian perpotongan ini akan membentuk garis lurus ketika dihubungkan. Perpanjangan garis lurus tersebut hingga memotong sumbu beban (vertikal) menghasilkan estimasi beban runtuh, dengan asumsi kurva beban-penurunan berbentuk parabola. Metode ini bersifat konservatif, di mana nilai beban keruntuhan yang diperoleh biasanya mendekati 80% dari kapasitas ultimit aktual, sehingga cocok untuk analisis awal yang mengutamakan faktor keamanan.



Gambar 1. Grafik hubungan beban dengan penurunan metode Mazurkiewicz

2.3 Interpretasi Loading Test

Dalam pemodelan geoteknik menggunakan PLAXIS 3D, model Mohr-Coulomb (MC) dan Hardening Soil (HS) menawarkan pendekatan berbeda dimana MC sebagai model elastis-perfektly plastis dengan parameter dasar (kohesi [c], sudut geser [ϕ], sudut dilatasi [ψ], modulus elastisitas [E], dan rasio Poisson [ν]) cocok untuk analisis beban monotonik sederhana, namun memiliki keterbatasan dalam mengabaikan ketergantungan kekuatan tanah pada regangan (strain-dependent stiffness) dan pengaruh sejarah pembebanan (stress-path dependency); sedangkan model HS yang bersifat elastoplastis dengan pengerasan (strain hardening) melalui parameter modulus sekant (E_{so}), modulus tangen (E_{ur}), dan modulus pembebanan ulang (E_{oc}) serta kriteria kegagalan hiperbolik, mampu memprediksi secara lebih akurat nonlinieritas tanah pada regangan kecil, respons berbeda antara pembebanan awal dan ulang, serta fenomena penurunan jangka panjang (creep) (Brinkgreve, 2012).

Penelitian (Andrianopoulos, 2023) membuktikan keunggulan model Hardening Soil dalam analisis interaksi siklik tiang-tanah lunak. Hasil studi menunjukkan peningkatan akurasi hingga 85% dalam memprediksi deformasi

lateral tiang dibandingkan model Mohr-Coulomb, khususnya pada pembebanan berulang.

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada proyek pembangunan Gedung Rawat Inap Tower-1 RS Haji Medan, yang berlokasi di Jl. Rumah Sakit Haji No. 47, Kec. Percut Sei Tuan, Kab. Deli Serdang, Sumatera Utara. Pengujian lapangan dan analisis data dilaksanakan pada Desember 2022 – Mei 2023, meliputi:

- a. Uji Pembebanan Statis (Static Load Test) pada pondasi spun pile diameter 60 cm.
- b. Pengambilan Data SPT dari hasil penyelidikan tanah (borehole log BH-2).
- c. Simulasi Numerik menggunakan PLAXIS 3D.

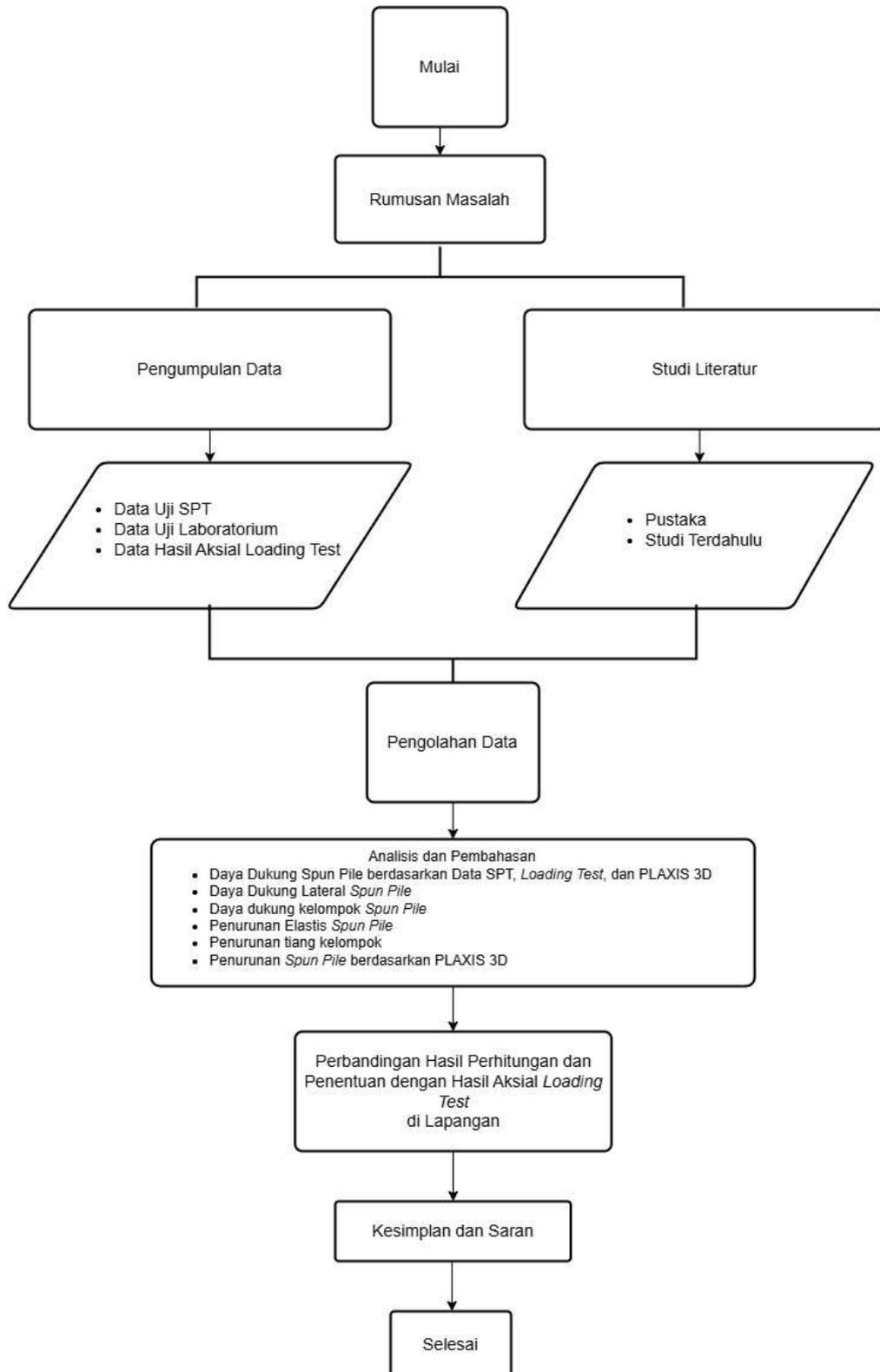
3.2 Sistem Hydraulic Static Pile Driver dalam Pengujian Pembebanan Aksial

Pengujian pembebanan statis pada spun pile diameter 60 cm ini menggunakan Hydraulic Static Pile Driver dengan sistem reaksi kentledge seberat 342,9 ton. Beban mati disusun secara modular menggunakan balok beton pracetak bertingkat yang berfungsi sebagai counterweight terhadap gaya tekan yang dihasilkan oleh sistem hidrolik. Sistem ini mampu menerapkan pembebanan bertahap dengan presisi tinggi, dimulai dari 25% (40 ton), 50% (80 ton), hingga 200% (320 ton) dari beban kerja rencana.

Prosedur pengujian terkendali mengikuti protokol ASTM D1143-20 dengan pembebanan bertahap yang dipertahankan selama 120 menit per tahap, dimana stabilitas beban dipantau melalui kriteria laju penurunan maksimum ≤ 0.25 mm/jam. Pengujian dihentikan secara otomatis jika terdeteksi salah satu dari kondisi berikut: (1) deformasi melebihi 10% diameter tiang (6 cm untuk pile $\varnothing 60$ cm), (2) kegagalan sistem hidrolik yang ditandai dengan penurunan tekanan $>5\%$ dari setpoint, atau (3) ketidakstabilan struktur kentledge yang dimonitor melalui inclinometer dengan toleransi kemiringan $<0.5^\circ$ (Bowles, 1996) Sistem penghentian otomatis ini diintegrasikan dengan data logger untuk memastikan keselamatan dan validitas data selama pengujian berlangsung.

3.3 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini mengikuti tahapan sistematis berikut:



Gambar 2. Diagram alir penelitian

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Daya Dukung Berdasarkan Data SPT

Perhitungan daya dukung ultimit menggunakan data SPT BH-2 dengan metode Meyerhof menghasilkan kapasitas ultimit sebesar 321,9 ton, dengan komponen tahanan ujung (Q_p) 119 ton dan gesekan selimut (Q_s) 209,4 ton. Hasil ini menunjukkan dominasi kontribusi gesekan selimut (65,1%) dibandingkan tahanan ujung (34,9%), sesuai dengan karakteristik tanah di lokasi penelitian yang didominasi lapisan lempung lanau (silty clay) dan pasir. Analisis stratigrafi mengungkap bahwa lapisan tanah pada kedalaman 15–25 m (dengan N-SPT terkoreksi 20–35) memberikan kontribusi tertinggi (72,5%) terhadap total gesekan selimut..

4.2 Interpretasi Hasil Loading Test

Kurva beban-penurunan dari uji pembebanan statis (200% beban rencana / 320 ton) menghasilkan tiga estimasi kapasitas ultimit::

Metode Davisson: 410 ton

Metode Mazurkiewicz: 430 ton

Metode Chin: 476 ton (gradien kurva $C1=0,0021$) .

Nilai Davisson (410 ton) dipilih sebagai acuan utama karena paling konservatif dan memenuhi faktor keamanan $SF=2,56$ ($Q_{all}=164$ ton > beban rencana 160 ton).

4.3 Simulasi Numerik dengan PLAXIS 3D

Pemodelan elemen hingga memberikan hasil yang konsisten dengan data lapangan (Tabel 4.1):

Tabel 4.1 Perbandingan Hasil Simulasi

Parameter	Mohr-Coulumb	Hardening Soil	Loading Test	Deviasi (%)
Qu (ton)	398	432	320	2,9-5,4
Penurunan (mm)	10,19	8,053	6,66	1,45

Model Hardening Soil menunjukkan kinerja superior dengan deviasi rata-rata sebesar 3,8% pada simulasi fase plastis, yang secara signifikan lebih akurat dalam memprediksi respons non-linier tanah dibandingkan model konvensional. Temuan ini konsisten dengan hasil verifikasi Brinkgreve (2020) dalam manual PLAXIS yang menunjukkan keunggulan model HS dalam analisis regangan besar, serta didukung oleh studi (Schanz, 2019) dalam PLAXIS Bulletin membuktikan bahwa formulasi matematis Hardening Soil Model mampu merepresentasikan

perilaku non-linier tanah dengan akurat, khususnya pada fase plastis dan pembebanan siklik.

5.KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis daya dukung aksial dan penurunan pondasi tiang Spun pile diameter 60 cm pada proyek Gedung Rawat Inap Tower-1 RS Haji Medan, dapat disimpulkan hal-hal berikut:

1. Daya Dukung Aksial Berdasarkan Data SPT dan Loading Test:
 - a) Perhitungan daya dukung ultimit (Q_u) menggunakan data SPT dengan metode Meyerhoff menghasilkan nilai sebesar 321,9 ton, sementara pengukuran langsung dengan manometer memberikan nilai 342,9 ton. Interpretasi hasil loading test dengan metode Davisson, Mazurkiewicz, dan Chin masing-masing menunjukkan nilai yang lebih tinggi, yaitu 410 ton, 430 ton, dan 476 ton. Perbandingan ini mengungkapkan bahwa metode Meyerhoff berbasis SPT dan pembacaan manometer sama-sama memberikan nilai yang lebih rendah dibandingkan hasil loading test, dengan selisih manometer terhadap Meyerhoff sebesar 21 ton (6,5% lebih tinggi). Hal ini semakin memperkuat kesimpulan bahwa pendekatan empiris cenderung lebih konservatif dibandingkan uji lapangan langsung, meskipun pembacaan manometer yang bersifat insitu pun masih menunjukkan nilai di bawah hasil interpretasi loading test.
 - b) Faktor keamanan (SF) untuk semua metode memenuhi syarat ($SF > 2,5$), dengan nilai tertinggi pada metode Chin ($SF = 2,97$). Daya dukung izin (Q_{all}) ditetapkan sebesar 164 ton berdasarkan metode Davisson, yang masih memenuhi kriteria keamanan ($SF \geq 2,5$) untuk menjamin keamanan struktur.
2. Penurunan Elastis Tiang Tunggal:
 - a) Analitis: Penurunan elastis tiang tunggal (16,4 mm) berada di bawah batas toleransi penurunan tiang tunggal (25 mm) dan kelompok tiang (46,38 mm) menunjukkan desain yang aman.
 - b) PLAXIS 3D: Simulasi dengan model Hardening Soil mendekati hasil loading test (penurunan 8,05 mm vs 6,66 mm), sementara model Mohr-Coulomb cenderung overestimate (10,19 mm). Hal ini membuktikan keunggulan model Hardening Soil dalam menangkap perilaku non-linier tanah.
3. Perbandingan Metode Analitis dan Numerik:
 - a) Analisis dengan PLAXIS 3D memberikan hasil yang mendekati kondisi lapangan, terutama dalam memprediksi penurunan. Pemodelan elemen hingga mampu menangkap interaksi tanah-tiang secara komprehensif, meskipun terdapat sedikit underestimasi pada penurunan elastis (1,09 mm lebih rendah daripada loading test).
 - b) Penggunaan model tanah Mohr-Coulomb dan Hardening Soil dalam PLAXIS 3D menunjukkan konsistensi dengan parameter tanah aktual, meskipun diperlukan kalibrasi lebih lanjut untuk meningkatkan akurasi..
4. Efisiensi Kelompok Tiang:
 - a) Analisis efisiensi kelompok tiang (metode Feld, Converse-Labarre, dll.) menunjukkan reduksi kapasitas dukung sebesar 18-25% akibat interaksi

antar-tiang, sehingga perlu pertimbangan dalam desain.

5.2 Saran

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan:

1. Peningkatan Akurasi Pemodelan:
Melakukan uji laboratorium tambahan untuk menentukan parameter tanah (seperti kohesi, sudut geser, dan modulus elastisitas) secara langsung, guna mengurangi ketergantungan pada korelasi empiris dari data SPT.
2. Validasi Lapangan:
 - a. Melakukan loading test pada lebih banyak tiang untuk memvalidasi variasi daya dukung akibat heterogenitas tanah.
 - b. Memantau penurunan jangka panjang (long-term settlement) untuk mengevaluasi pengaruh konsolidasi tanah.
3. Optimasi Desain:
 - a. Menyelidiki efisiensi penggunaan diameter tiang yang lebih kecil atau pengaturan kelompok tiang untuk mengurangi biaya tanpa mengorbankan keamanan.
 - b. Mengeksplorasi kombinasi metode analitis, numerik, dan machine learning untuk prediksi daya dukung yang lebih cepat dan akurat.Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan konfirmasi atas keandalan desain pondasi proyek, tetapi juga menjadi dasar untuk pengembangan metode analisis geoteknik yang lebih maju di masa depan..

DAFTAR PUSTAKA

- Andrianopoulos. (2023). *Advanced constitutive modeling of cyclic pile-soil interaction in soft clays*.
- ASTM D1143. (1994). *ASTM D1143 Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load*.
- Bowles, J. (1996). *Foundation Analysis and Design*.
- Brinkgreve, R. (2012). *Plaxis 3D Material Models Manual*.
- Fellenius, B. . (2020). *Basics of Foundation Design*.
- Hannigan, P. J. (2016). *Design and Construction of Driven Pile Foundations—Comprehensive Design Examples*. Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Transportation.
- Hardiyatmo, H. C. (2018). *Mekanika Tanah Jilid II*. Gadjah Mada University Press.
- Hardyatmo, H. C. (2010). *Teknik Pondasi, jilid 1 dan 2*. Gramedia.
- Hutapea, D. (2021). Analisis Daya Dukung dan Penurunan Pondasi Tiang Bor dengan Plaxis 3D terhadap Hasil Loading Test. *Jurnal Syntax Admiration*.
- Marbun, B. . (2022). Karakteristik Geoteknik Tanah Aluvial di Kawasan Medan Kota dan Implikasinya terhadap Desain Pondasi. *Jurnal Teknik Sipil ITEKIN*.
- Nugroho, A & Santoso, B. (2022). *Kajian Produksi Spun Pile di Indonesia*.
- Schanz, T. (2019). *The Hardening Soil Model - Formulation and Verification*.
- Silitonga, A. (2017). Karakteristik Tanah Lunak di Wilayah Medan Marelan dan Pengaruhnya terhadap Daya Dukung Pondasi. *Jurnal Teknik Sipil USU*.
- SNI 8460:2017. (n.d.). *Persyaratan perancangan geoteknik SNI 8460:2017*. Standar Nasional Indonesia.
- Zhang, L., et al. (2021). *A comparative study of different variable selection methods based on numerical simulation and empirical analysis*. Journal of Geotechnical Engineering.