

## Evaluasi Distribusi Daya Dukung Gesek Tiang Pancang Tunggal Berdasarkan Metode Empiris dan Pengujian Dinamis di Tanah Lempung Padat

Harnedi Maizir<sup>1\*</sup>, Raihan Arditama Harnedi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru, Jl. Dirgantara No.4, Pekanbaru, Indonesia

<sup>2</sup>Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

\*harnedi@sttp-yds.ac.id

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi distribusi daya dukung gesek pada tiang pancang tunggal melalui pendekatan empiris berbasis data Standard Penetration Test (SPT) dan verifikasi menggunakan pengujian dinamis dengan Pile Driving Analyzer (PDA) yang dianalisis melalui perangkat lunak CAPWAP. Sebagai pembandingan, dilakukan pula uji beban statik (Static Load Test) pada lokasi studi yang berlokasi di proyek pembangunan Rumah Sakit Universitas Riau, Pekanbaru. Hasil analisis menunjukkan bahwa distribusi daya dukung gesek yang diperoleh dari metode empiris dan pengujian dinamis memiliki kesesuaian yang tinggi, baik dari segi pola maupun besaran. Selain itu, kapasitas ultimit hasil PDA dan SLT menunjukkan perbedaan yang relatif kecil, sekitar 5%. Temuan penting lainnya menunjukkan bahwa kontribusi daya dukung ujung terhadap total kapasitas tiang sangat terbatas akibat deformasi yang belum mencukupi, sehingga mekanisme gesekan sepanjang tiang menjadi elemen dominan dalam transfer beban. Studi ini menegaskan pentingnya integrasi antara pendekatan empiris dan uji lapangan dalam merancang pondasi tiang secara andal dan efisien.

**Keywords:** Daya Dukung, , Pile Driver Analysis, Prediksi SPT, Tiang Pancang Transfer Beban

### 1. Pendahuluan

Beragam pendekatan telah dikembangkan untuk memperkirakan kapasitas daya dukung tiang pancang, yang secara umum dapat diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama, yakni metode analitik dan metode empiris. Metode analitik bergantung pada estimasi parameter tanah yang diperoleh melalui investigasi geoteknik di lapangan, dan sangat dipengaruhi oleh kualitas data serta kemampuan insinyur dalam melakukan interpretasi dan seleksi parameter yang tepat [1], [2].

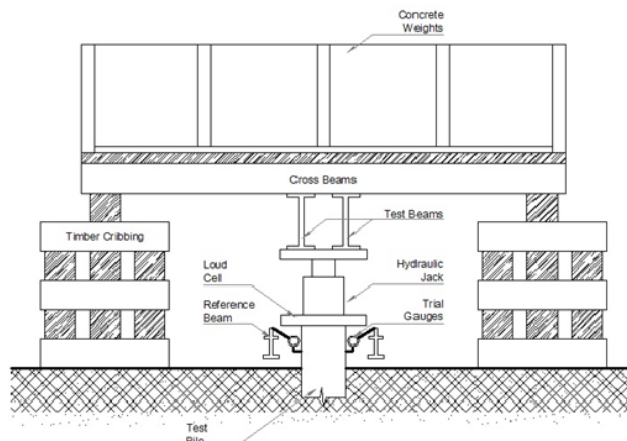
Sementara itu, metode empiris yang didasarkan pada data hasil *Standard Penetration Test* (SPT) telah terbukti memberikan hasil prediksi yang lebih representatif terhadap daya dukung gesek tiang pancang dibandingkan pendekatan analitik, terutama dalam kondisi tanah

alami yang kompleks [3]. Meskipun demikian, ketidakpastian tetap dapat muncul akibat variasi sifat tanah dan parameter desain tiang yang tidak terdefinisi secara pasti. Oleh karena itu, uji beban tiang masih dianggap sebagai metode paling akurat dalam menentukan kapasitas dukung aktual suatu elemen pondasi dalam [4].

Secara umum, kapasitas daya dukung tiang terbagi menjadi dua komponen utama, yaitu daya dukung ujung (*end bearing*) dan daya dukung gesek (*shaft resistance*). Menentukan besarnya kontribusi dari masing-masing komponen tersebut tidaklah sederhana, sebab keduanya memerlukan deformasi yang berbeda untuk dapat termobilisasi secara penuh. Daya dukung gesek umumnya mulai termobilisasi pada deformasi sebesar 2% dari diameter tiang, sedangkan daya dukung ujung baru akan bekerja secara optimal jika terjadi deformasi sekitar 10% dari diameter tiang [5].

Studi-studi terdahulu menunjukkan bahwa kontribusi daya dukung ujung terhadap total kapasitas tiang relatif kecil, hanya berkisar antara 2–5%. Temuan ini menegaskan pentingnya peran daya dukung gesek dalam sistem pondasi tiang, khususnya dalam kondisi tanah lunak hingga sedang. Besarnya kontribusi daya dukung gesek ditentukan oleh berbagai faktor, antara lain jenis tiang, jenis tanah, serta pola deformasi tiang akibat pembebanan aksial. Mayoritas pendekatan analitik dalam memperkirakan kapasitas aksial tiang masih bersifat empiris. Oleh karena itu, validasi terhadap hasil prediksi perlu dilakukan melalui pengujian lapangan berskala penuh, seperti uji beban statik (*Static Load Test* atau SLT). Hal ini menunjukkan SLT mampu merepresentasikan respons aktual tiang dalam kondisi lapangan secara akurat. [6] Berbagai metode SLT telah dikembangkan, antara lain *Maintained Load Test* (MLT), *Constant Rate of Penetration* (CRP), dan *Osterberg Load Test* (OLT). Di banyak negara, pelaksanaan MLT pada sejumlah tiang acak merupakan persyaratan dalam proyek-proyek konstruksi besar. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk menentukan kapasitas maksimum tiang, serta mengevaluasi nilai penurunan (*settlement*) dan penurunan sisa (*residual settlement*) akibat pembebanan [7].

Prosedur pelaksanaan MLT secara umum mengacu pada standar internasional seperti ASTM D1143. Meskipun telah terbukti memberikan hasil yang reliabel, metode ini memiliki kekurangan berupa waktu pelaksanaan yang lama dan biaya yang relatif tinggi, seperti terlihat pada Gambar 1.



Sumber : Santoso & Hartono, 2020

**Gambar 1.** Skema *Static Load Test*

Sebagai alternatif, pendekatan pengujian dinamis melalui *Pile Driving Analyzer* (PDA) menjadi pilihan yang lebih efisien secara waktu dan biaya. Teknologi ini dikembangkan berdasarkan teori gelombang satu-dimensi dan terintegrasi dalam perangkat lunak *Case Pile Wave Analysis Program* (CAPWAP) [9]. Uji PDA memungkinkan pelaksanaan pengujian dalam waktu singkat dan pada lebih banyak sampel tiang, sehingga meningkatkan representativitas data. Kombinasi antara PDA dan monitoring selama proses pemancangan memberikan nilai

tambah dalam memprediksi kapasitas daya dukung tiang, baik dari sisi total kapasitas maupun distribusi beban sepanjang elemen tiang.

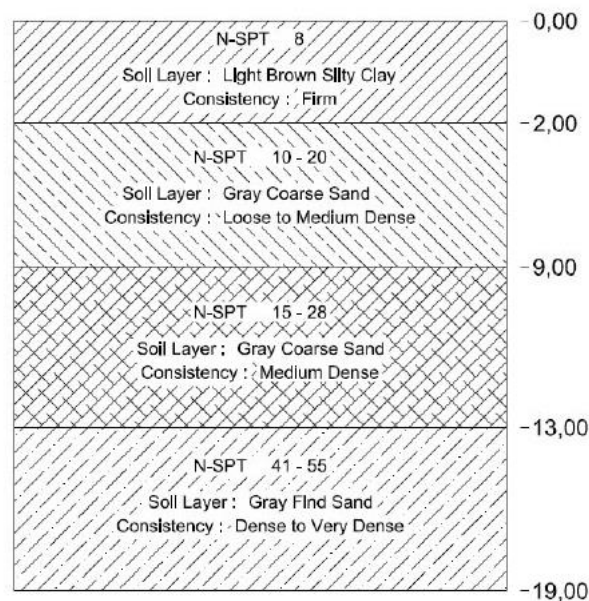
Studi ini secara khusus bertujuan untuk menganalisis prediksi distribusi daya dukung gesek sepanjang tiang berdasarkan pendekatan analitik dan data hasil uji SPT. Akurasi dari hasil prediksi tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil uji beban statik dan dinamik menggunakan PDA serta program CAPWAP.

## 2. Metodologi

Penelitian ini dilaksanakan berdasarkan data proyek pembangunan Rumah Sakit Universitas Riau yang berlokasi di Kota Pekanbaru, Indonesia. Proyek ini merupakan konstruksi gedung bertingkat delapan yang menggunakan pondasi tiang pancang. Tiang yang digunakan memiliki diameter sebesar 350 mm dan ditanam pada kedalaman antara 12 hingga 14 meter dari permukaan tanah alami.

### 2.1 Data Lokasi dan Profil Tanah

Data kondisi bawah permukaan tanah diperoleh dari laporan investigasi tanah yang dilaksanakan di lokasi proyek. Berdasarkan hasil pengeboran dan uji laboratorium, diketahui bahwa lapisan tanah didominasi oleh tanah lempung kelabu dengan konsistensi padat hingga sangat padat. Informasi ini divisualisasikan dalam bentuk profil stratigrafi tanah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Sumber : Data Penelitian, 2025

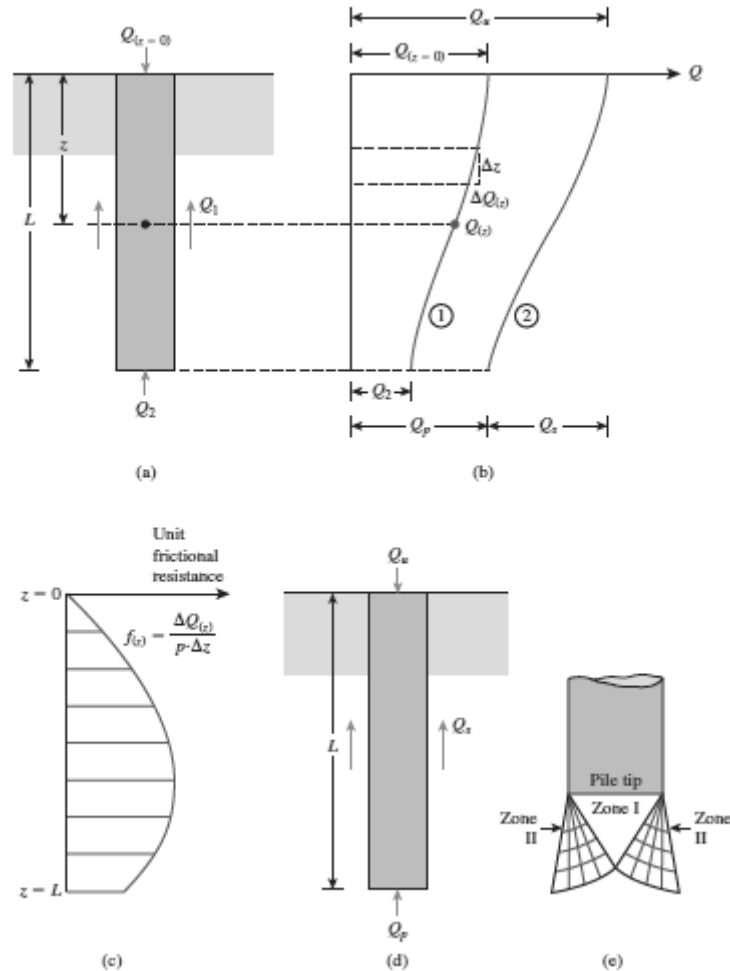
**Gambar 2.** Stratigrafi Tanah

### 2.2 Prinsip Pemindahan Beban Tiang

Pondasi tiang bekerja dengan memindahkan beban aksial ke tanah melalui dua mekanisme utama, yakni daya dukung gesek (*shaft resistance*) yang bekerja sepanjang permukaan sisi tiang dan daya dukung ujung (*end bearing*) yang bekerja pada dasar (*toe*) tiang. Dalam sistem ini, sebagian beban vertikal ditransfer melalui gesekan antara dinding tiang dan tanah sekitarnya, sedangkan sisanya diteruskan ke tanah di bawah ujung tiang. Untuk mengetahui distribusi beban secara vertikal, digunakan instrumentasi seperti strain gauge dan akselerometer yang dipasang pada beberapa kedalaman sepanjang badan tiang. Melalui

pendekatan ini, dimungkinkan untuk menghitung proporsi beban yang ditahan oleh gesekan sisi pada kedalaman tertentu, serta besaran beban yang diteruskan ke ujung tiang.

Distribusi beban sepanjang kedalaman tiang, baik yang ditahan oleh gesekan maupun ujung, secara umum mengikuti pola sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 3, yang merupakan representasi tipikal transfer beban pada pondasi [10].



Sumber : B. M. Das and N. Sivakugan, 2019

**Gambar 3.** Transfer Beban Tipikal Tiang Pancang

### 2.3 Perhitungan Gaya Gesek Satuan

Besarnya gaya gesek satuan pada kedalaman tertentu, atau sering disebut sebagai unit shaft resistance  $f_z$ , dihitung menggunakan rumus berikut [10]:

$$f_z = \frac{\Delta Q_z}{P \cdot \Delta z} \quad (1)$$

di mana:

- $\Delta Q_z$  = Selisih beban antara dua kedalaman,
- $P$  = Keliling penampang melintang tiang,
- $\Delta z$  = Jarak antar dua titik kedalaman.

Rumus ini mengacu pada prinsip *load transfer method* yang telah digunakan secara luas dalam perhitungan kapasitas pondasi dalam, baik dalam studi eksperimental maupun pemodelan numerik.

## 2.4 Pengujian dan Analisis Data

Metode prediksi daya dukung gesek yang digunakan dalam studi ini terdiri atas dua pendekatan utama, yaitu pendekatan empiris berdasarkan nilai N-SPT dan analisis data uji dinamik menggunakan PDA dan CAPWAP.

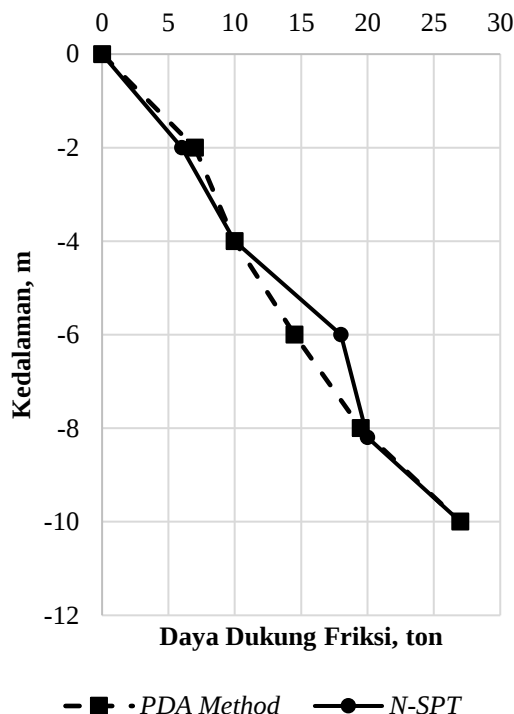
Selanjutnya, hasil prediksi dari kedua metode tersebut dibandingkan dengan hasil uji beban statik (*Static Load Test* atau SLT) guna mengevaluasi tingkat akurasi dan keandalan pendekatan prediktif tersebut. Analisis dilakukan untuk mengetahui distribusi daya dukung gesek aktual di lapangan serta kontribusinya terhadap total kapasitas dukung tiang.

## 3. Hasil dan Analisis

Bagian ini menyajikan hasil analisis distribusi daya dukung gesek tiang tunggal yang diperoleh dari metode empiris berbasis data N-SPT dan dibandingkan dengan hasil uji dinamik menggunakan alat *Pile Driving Analyzer* (PDA) yang dianalisis lebih lanjut dengan perangkat lunak CAPWAP. Selain itu, dilakukan juga perbandingan dengan hasil *Static Load Test* (SLT) untuk mengevaluasi kesesuaian dan akurasi masing-masing metode.

### 3.1 Perbandingan Antara Analisis Empiris (N-SPT) dan Hasil Uji PDA

Gambar 4 menunjukkan perbandingan antara distribusi daya dukung gesek hasil prediksi metode empiris berbasis nilai N-SPT dan hasil yang diperoleh dari uji PDA. Secara umum, hasil kedua metode menunjukkan pola distribusi yang sejalan dan saling mendekati. Hal ini mengindikasikan bahwa pendekatan empiris dari nilai N-SPT dapat digunakan secara efektif untuk estimasi awal distribusi daya dukung gesek pada tiang pancang.



Sumber : Hasil Analisa, 2025

**Gambar 4.** Hubungan Daya Dukung Friksi dan Kedalaman

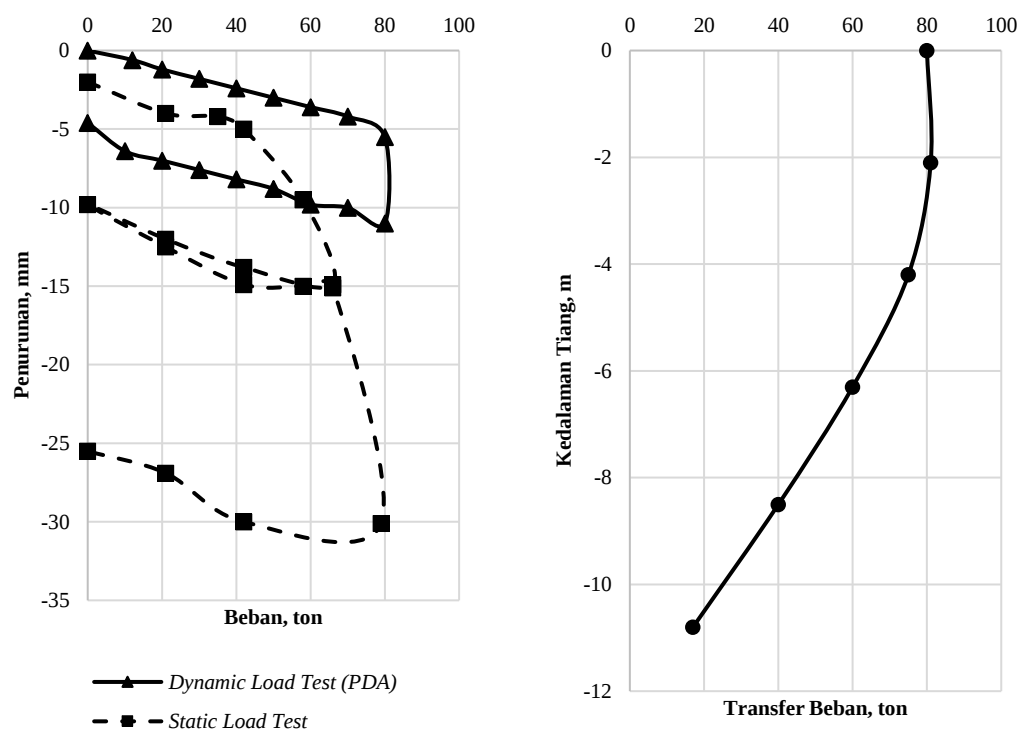
Kemiripan ini juga menunjukkan bahwa korelasi antara nilai penetrasi standar dan gesekan tanah terhadap tiang cukup kuat di lokasi studi, sehingga pendekatan ini dapat diterapkan dalam kondisi tanah serupa di wilayah lain, terutama untuk estimasi awal kapasitas gesek tiang sebelum dilakukan verifikasi dengan uji lapangan.

### 3.2 Perbandingan Antara Uji Beban Statik dan PDA

Perbandingan antara hasil uji beban statik (SLT) dan uji dinamik (PDA) disajikan dalam Gambar 5. Dari grafik tersebut terlihat bahwa terdapat perbedaan sekitar 5% antara nilai kapasitas ultimit tiang yang diperoleh dari kedua metode. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh belum pulihnya kekuatan tanah di sekitar tiang setelah proses pemancangan dan pengujian PDA.

Selain itu, dari kurva beban–penurunan (*load-settlement curve*) yang ditampilkan, dapat diamati bahwa respon tiang terhadap pembebanan pada uji PDA cenderung lebih kaku dibandingkan SLT, yang terlihat dari penurunan yang lebih kecil pada beban ultimit. Hal ini dapat disebabkan oleh perbedaan kondisi loading: uji PDA bersifat impulsif dan sangat cepat, sedangkan SLT dilakukan secara bertahap dan lambat, sehingga mampu menangkap deformasi tanah secara lebih progresif.

Kurva distribusi beban hasil PDA juga menunjukkan bahwa sebagian besar beban ditransfer melalui mekanisme gesek, dan hanya sebagian kecil yang didistribusikan ke ujung tiang. Temuan ini konsisten dengan fenomena umum pada tiang pancang di tanah lempung padat, di mana gesekan dominan dalam mendukung beban aksial tiang.



Sumber : Hasil Analisa, 2025

**Gambar 5.** Hasil Uji *Static Load Test* dan PDA

## 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan penting sebagai berikut:

1. Distribusi daya dukung gesek yang diperoleh dari metode empiris berbasis SPT dan uji PDA menunjukkan pola yang sebanding, baik dari segi besaran maupun distribusinya sepanjang kedalaman tiang. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan empiris dapat digunakan sebagai metode prediksi awal yang cukup akurat, khususnya untuk kondisi tanah seperti pada lokasi studi.
2. Uji beban statik dan uji dinamik memberikan hasil kapasitas ultimit yang relatif mendekati, dengan perbedaan nilai maksimum hanya sekitar 5%. Perbedaan ini dapat dikaitkan dengan ketidakpulihan kekuatan tanah setelah pemancangan, serta perbedaan karakteristik pembebanan antara metode dinamik dan statik.
3. Hasil SLT dan PDA menunjukkan bahwa kontribusi daya dukung ujung tiang terhadap total kapasitas relatif kecil, yang mengindikasikan bahwa mekanisme transfer beban utama berasal dari gaya gesek sepanjang batang tiang. Hal ini menguatkan temuan pada studi-studi sebelumnya bahwa, pada kondisi deformasi terbatas, mobilisasi penuh dari daya dukung ujung sulit dicapai.

Penggunaan kombinasi metode prediktif dan verifikasi lapangan sangat disarankan dalam desain pondasi tiang, terutama pada proyek-proyek berskala besar atau pada kondisi tanah yang kompleks. Pendekatan ini dapat meningkatkan keandalan desain sekaligus mengoptimalkan efisiensi biaya dan waktu pelaksanaan proyek.

## Daftar Pustaka

- [1] A. Honarjoo and V. Ghiasi, "Analyzing analytical and software methods for deep foundation analysis and presenting a new solution for determining pile capacity using the PDA test," *International Journal of Geo-Engineering*, vol. 16, no. 1, 2025, doi: 10.1186/s40703-025-00242-8.
- [2] T. N. Salem, A. S. El-Saei, K. Krajníková, D. Katunský, and R. Hassan, "Numerical Investigation of Large-Diameter Bored Piles under High-Strain Dynamic Testing: A Case Study in New Alamein City," *Buildings*, vol. 14, no. 4, 2024, doi: 10.3390/buildings14041133.
- [3] H. T. Santoso and J. Hartono, "Analisis Perbandingan Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Berdasar Hasil Uji Spt Dan Pengujian Dinamis," *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, vol. 4, no. 1, p. 30, 2020, doi: 10.20961/jrrs.v4i1.44635.
- [4] T. de J. Souza, A. Querelli, F. V. A. de S. Cruz, and P. C. Trejo-Noreña, "Use of the dynamic load test to obtain the pile capacity – The Brazilian experience," *DYNA (Colombia)*, vol. 88, no. 217, pp. 169–177, 2021, doi: 10.15446/dyna.v88n217.93416.
- [5] S. Youwai and C. Thongnoo, "Transformer-Based Deep Learning Model for Bored Pile Load-Deformation Prediction in Bangkok Subsoil," pp. 1–10, 2023, [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2312.03041>
- [6] H. T. Santoso and J. Hartono, "Analisis Perbandingan Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Berdasar Hasil Uji Spt Dan Pengujian Dinamis," *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, vol. 4, no. 1, p. 30, 2020, doi: 10.20961/jrrs.v4i1.44635.
- [7] C. Li and X. Li, "Evaluation of bearing capacity of PHC pipe piles via the dynamic and static loading test," *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 11, no. February, pp. 1–10, 2023, doi: 10.3389/feart.2023.1130294.
- [8] ASTM D1143, "Standard Test Method for Pile Under Static Axial Compressive Load," *ASTM International*, vol. D1143/D114, no. Reapproved 2013, pp. 112–126, 2007, [Online]. Available: [www.astm.org](http://www.astm.org)

- [9] W. W. Li, M. K. Wong, and Y. K. Chan, "The Application of PDA/CAPWAP to Ensure Quality and Capacity in Driving Long Steel H-piles," *HKIE Transactions Hong Kong Institution of Engineers*, vol. 18, no. 2, pp. 34–39, 2011, doi: 10.1080/1023697X.2011.10668229.
- [10] B. M. Das and N. Sivakugan, *Principles of Foundation Engineering: Ninth Edition*, no. 2006466025. Cengage Learning, 2019.