

## Evaluasi daya dukung aksial pondasi tiang pancang pada tanah lempung di Jakarta Timur

Muhammad Zakki Rizal Hidayat<sup>1</sup>, Muhammad Irfan Marasabessy<sup>1,2\*</sup>, Muhamad Fadlan Alhamid<sup>1,2</sup>, Wahyu Nur Rohman<sup>1</sup>, Mayangsari Rafiqqa Putri<sup>1</sup>, Nufrizal Faried Hanafi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> PT. Pola Data Consultant, Sleman, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Sleman, Indonesia

### Article Info

Available online

### Keywords:

Axial Bearing Capacity  
Pile Foundation  
Hydraulic Static Pile Driver  
Clay Soil  
Pile Driving Analyzer

### Corresponding Author:

M. Irfan Marasabessy  
irfanmarssy@uii.ac.id

### Abstract

*This study evaluates the axial bearing capacity of pile foundations on clay soil in Cakung, East Jakarta, a region with complex soil conditions for construction. The research involves collecting field data using a Hydraulic Static Pile Driver (HSPD) to measure hydraulic pressure during pile installation and analyzing data from Standard Penetration Tests (SPT) and Pile Driving Analyzer (PDA) tests. Results show significant variations in bearing capacity at different depths, ranging from 8 to 12 meters. Pile points near BH-04 and BH-03 faced difficulties reaching 12 meters depth as the soil bearing capacity exceeded the HSPD capacity before this depth. A substantial increase in post-installation bearing capacity was observed through PDA tests, with an increase of 79.19 tons at grid A-5 after 19 days. This increase is due to augmented friction over time, as shown by CAPWAP analysis in the PDA tests. There is a strong correlation between HSPD manometer data and undrained shear strength ( $C_u$ ), with a determination coefficient ( $R^2$ ) of 0.8286. Using HSPD manometer data for evaluating bearing capacity provides more accurate and consistent results compared to conventional methods relying solely on soil investigation data. Additionally, the use of HSPD in pile installation offers better control over pile positioning and depth, while reducing vibration and noise impacts, making it suitable for densely populated urban areas. PDA tests validate HSPD data, demonstrating significant post-installation capacity increases, crucial for ensuring structural safety and stability.*

Copyright © 2024 Universitas Islam Indonesia  
All rights reserved

### Pendahuluan

#### Latar belakang

Pondasi merupakan salah satu elemen paling penting pada suatu bangunan, yang berfungsi menyalurkan beban dari struktur atas ke tanah di bawahnya. Tanpa pondasi yang kuat, bangunan tidak dapat berdiri kokoh dan stabil, sehingga keberadaan pondasi yang tepat sangat krusial dalam menjamin keamanan dan keberlanjutan bangunan. Pondasi juga seringkali

merupakan *critical path* dalam proses konstruksi (Primaswari dkk., 2022), sehingga keterlambatan yang disebabkan oleh masalah pada pekerjaan pondasi harus dihindari untuk menjaga kelancaran proyek secara keseluruhan.

Salah satu jenis pondasi yang sering digunakan adalah pondasi tiang pancang, yang diproduksi secara fabrikasi sehingga ukuran panjang modularnya harus ditentukan sejak awal. Metode instalasi tiang pancang yang umum digunakan di daerah

perkotaan adalah *jack-in pile*, di mana tiang pancang didorong ke dalam tanah menggunakan alat *Hydraulic Static Pile Driver* (HSPD). Keuntungan utama dari metode *jack-in pile* adalah lebih ramah lingkungan (tidak berisik, tidak mengeluarkan asap, dan tidak menimbulkan getaran pada tanah), serta kemampuannya untuk menyediakan instalasi tiang pancang yang presisi dan efisien (Jawat, 2016). Metode ini memungkinkan kontrol yang lebih baik terhadap kedalaman, posisi tiang pancang, dan daya dukung tiang pancang melalui manometer, sehingga meminimalkan risiko kesalahan dalam instalasi.

Penentuan panjang modular yang tidak tepat dapat menimbulkan dua masalah utama, yaitu jika ukuran pondasi terlalu pendek, daya dukung pondasi mungkin tidak mencapai nilai yang diharapkan, meningkatkan potensi kega-galan struktur. Sebaliknya, jika ukuran pondasi terlalu panjang, bagian tiang yang tidak dapat menembus kedalaman rencana harus dipotong, mengakibatkan pemborosan material dan peningkatan biaya. Oleh karena itu, evaluasi yang tepat terhadap daya dukung aksial pondasi tiang pancang pada berbagai jenis tanah, seperti tanah lempung di daerah Cakung, Jakarta Timur, menjadi sangat penting untuk memastikan efisiensi dan keberhasilan proyek konstruksi.

### **Tujuan penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan evaluasi yang komprehensif terhadap daya dukung aksial pondasi tiang pancang, guna mengoptimalkan desain dan pelaksanaan pondasi,

### **Landasan Teori**

#### ***Tanah lempung dan karakteristiknya***

Tanah lempung adalah jenis tanah yang memiliki partikel berukuran sangat kecil dan sifat kohesif yang tinggi. Tanah ini dikenal dengan kapasitas retensi air yang tinggi, plastisitas, dan potensi penyusutan dan pengembangan yang signifikan (Das, 2011). Karakteristik ini membuat tanah lempung

menjadi tantangan dalam konstruksi pondasi karena perubahan volume yang bisa terjadi akibat perubahan kadar air, yang dapat mempengaruhi kestabilan dan kinerja pondasi.

Tanah lempung juga memiliki kecepatan konsolidasi yang lambat, yang berarti bahwa penurunan tanah akibat beban struktural dapat terjadi secara perlahan selama periode waktu yang panjang. Hal ini penting untuk dipertimbangkan dalam desain pondasi karena penurunan yang tidak terduga dapat menyebabkan kerusakan pada struktur di atasnya. Karena itu, analisis yang menyeluruh terhadap karakteristik tanah lempung dan interaksinya dengan pondasi sangat penting untuk memastikan keberhasilan proyek konstruksi (Craig, 2004).

#### ***Pondasi tiang pancang***

Pondasi tiang pancang merupakan elemen struktural yang umumnya terbuat dari baja, beton, beton bertulang atau kayu yang digunakan untuk mendukung beban struktur di atasnya dengan memanfaatkan daya dukung tanah pada kedalaman tertentu. Pondasi ini sering digunakan pada kondisi di mana tanah permukaan tidak cukup kuat untuk menahan beban struktur sehingga perlu ditransfer ke lapisan tanah yang lebih dalam dan lebih stabil (Das, 2011).

Tiang pancang memiliki peran penting dalam konstruksi karena kemampuannya untuk mentransfer beban melalui lapisan tanah yang kurang stabil ke lapisan yang lebih kokoh. Keuntungan lain dari penggunaan tiang pancang termasuk kemampuan untuk menahan beban vertikal yang besar, resistensi terhadap tanah yang bergerak, dan fleksibilitas dalam penggunaan di berbagai kondisi tanah. Dengan kemampuannya ini, tiang pancang menjadi solusi ideal untuk banyak proyek konstruksi, terutama di daerah yang memiliki kondisi tanah yang kurang menguntungkan (Coduto dkk., 2014).

**Daya dukung aksial pondasi tiang pancang**

Daya dukung aksial pondasi tiang pancang adalah kapasitas tiang dalam menahan beban vertikal yang diterapkan pada ujung atasnya. Daya dukung ini terdiri dari dua komponen utama, yaitu daya dukung ujung tiang (*end bearing capacity*) dan daya dukung geser kulit tiang (*skin friction capacity*). Daya dukung ujung tiang diperoleh dari tekanan langsung di ujung tiang yang bersentuhan dengan tanah padat atau batuan. Sedangkan daya dukung geser kulit berasal dari gesekan antara permukaan tiang dan tanah di sekitarnya sepanjang panjang tiang (Das, 2011).

**Metode instalasi tiang pancang menggunakan alat hydraulic static pile driver (HSPD)**

Metode instalasi tiang pancang mencakup berbagai teknik, yang paling umum adalah metode pemancangan dengan pukulan (*impact driving*) dan metode *jack-in*. Metode pemancangan dengan pukulan melibatkan penggunaan palu berat yang dijatuhkan pada kepala tiang untuk menancapkannya ke dalam tanah. Metode ini efektif tetapi menghasilkan getaran dan kebisingan yang signifikan. Metode *jack-in* menggunakan tekanan hidrolik untuk mendorong tiang ke dalam tanah dengan alat *Hydraulic Static Pile Driver* (HSPD), memberikan kontrol yang lebih baik terhadap posisi tiang dan mengurangi dampak getaran. Pemilihan metode instalasi tergantung pada kondisi tanah, tipe tiang, dan lingkungan sekitar proyek (Tomlinson & Woodward, 2008).

Kontrol daya dukung tiang selama instalasi dapat dilakukan melalui manometer pada alat HSPD. Manometer HSPD bekerja berdasarkan prinsip pengukuran tekanan hidrolik yang diterapkan pada tiang selama proses pemancangan (Tomlinson & Woodward, 2008). Tekanan yang dibaca oleh manometer dikonversi menjadi gaya pemancangan, menggunakan persamaan (1).

$$F = P / A \quad (1)$$

dimana:

$F$  = Daya dukung aksial (N)

$P$  = Tekanan hidrolik HSPD (MPa)

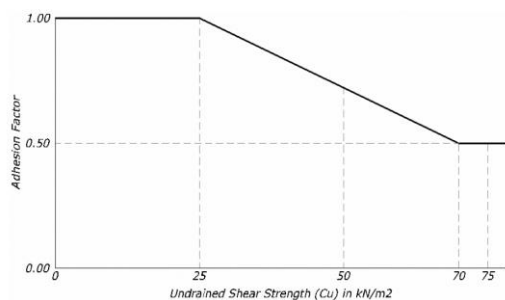
$A$  = Luas piston hidrolik (mm<sup>2</sup>)

**Metode evaluasi daya dukung aksial berdasarkan data N-SPT**

Evaluasi daya dukung aksial pondasi tiang pancang dapat dilakukan melalui berbagai metode, termasuk uji beban statis (*static load test*), uji beban dinamis (*dynamic load test*), dan prediksi berdasarkan parameter tanah seperti tes penetrasi standar (*Standard Penetration Test*, SPT) dan *cone penetration test* (CPT). Uji beban statis adalah metode paling langsung dan andal, melibatkan penerapan beban bertahap pada tiang dan mengukur penurunan yang terjadi hingga tiang mencapai kondisi kegagalan atau penurunan yang diizinkan. Sedangkan uji beban dinamis menggunakan peralatan khusus untuk memukul tiang dan menganalisis respons dinamisnya, memungkinkan penilaian cepat terhadap kapasitas tiang setelah pemasangan (Das, 2011).

Metode prediksi seperti SPT dan CPT memberikan estimasi awal terhadap daya dukung berdasarkan korelasi empiris antara parameter tanah dan daya dukung tiang. Metode ini sering digunakan pada tahap perencanaan dan desain untuk menentukan jumlah dan jenis tiang yang dibutuhkan. Kombinasi dari berbagai metode evaluasi memberikan gambaran yang lebih komprehensif dan akurat mengenai kapasitas dukung aksial pondasi tiang pancang (Fellenius, 2023).

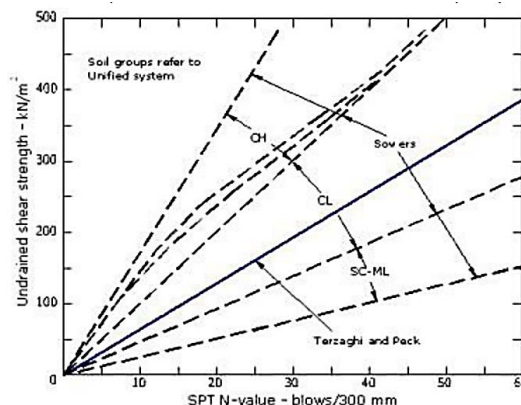
Pada tanah lempung, kapasitas daya dukung tiang pancang dapat ditentukan berdasarkan nilai *undrained shear strength* ( $C_u$ ). Friksi pada tiang pancang dihitung dengan menggunakan parameter *adhesion factor* ( $\alpha$ ) yang bervariasi tergantung metode yang digunakan. Metode pendekatan dalam menentukan *adhesion factor* ( $\alpha$ ) dapat terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Hubungan *adhesion factor* dan *undrained shear strength*

(American Petroleum Institute, 1987).

Korelasi antara nilai N-SPT dan *undrained shear strength* ( $C_u$ ) dari data hasil penelitian Terzaghi & Peck (1967) serta Showers (1979) diberikan untuk rentang jenis tanah CH (lempung plastisitas tinggi), CL (lempung plastisitas rendah), dan ML (lanau plastisitas rendah). Nilai  $C_u$  cenderung lebih tinggi untuk tanah CH (lempung plastisitas tinggi) dibandingkan dengan jenis tanah lainnya untuk nilai N-SPT yang sama. Tanah CL (lempung plastisitas rendah) menunjukkan nilai  $C_u$  yang lebih rendah dibandingkan tanah CH, dan tanah SC-ML (pasir lempungan dan lanau lempungan) memiliki nilai  $C_u$  yang paling rendah untuk nilai N-SPT yang sama. Perkiraan hubungan antara nilai N-SPT dan  $C_u$  ini dapat terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Hubungan nilai  $C_u$  dan N-SPT (Showers, 1979; Terzaghi & Peck, 1967)

Daya dukung ujung tiang pancang dihitung dengan persamaan  $Q_p = 9 C_u$ , yang menunjukkan bahwa daya dukung ujung sangat bergantung pada kohesi tanah (Bowles, 1996; Das, 2011).

### Tinjauan Pustaka

#### *Korelasi nilai undrained shear strength dan N-SPT*

Tabel 1 merangkum hasil korelasi antara nilai *Standard Penetration Test* (SPT) dan *undrained shear strength* ( $C_u$ ) dari berbagai penelitian terdahulu.

Tabel 1 Korelasi Nilai N-SPT dan *Undrained Shear Strength* ( $C_u$ )

Peneliti	Keterangan	$C_u$ (kPa)
Terzaghi & Peck (1967)	Tanah Berbutir Halus	6.25 N
Sanglerat (1972)	Tanah Lempung	12.5 N
	Tanah Lempung Lanau	10 N
Hara dkk. (1974)	Tanah Berbutir Halus	$29 N^{0.72}$
Nixon (1982)	Tanah Lempung	12 N
Ajayi & Balogun (1988)	Tanah Berbutir Halus	$1.39 N + 74.2$
Hettiarachchi & Brown (2009)	Tanah Berbutir Halus	4.1 N
Mina & Kusuma (2014)	Tanah Lempung	$S_u = 8.22 + 2.66 N$

Sumber: Ajayi & Balogun, 1988; Hara dkk., 1974; Hettiarachchi & Brown, 2009; Mina dkk., 2014; Nixon, 1982; Sanglerat, 1972; Terzaghi & Peck, 1967

### ***Evaluasi daya dukung pondasi tiang pancang pada tanah lempung***

Bachtiar (2012) melakukan evaluasi daya dukung ujung, selimut, dan ultimit fondasi tiang pancang beton persegi pada bangunan bertingkat di lapisan tanah lunak Pontianak. Analisis dilakukan secara empiris menggunakan data CPT dengan metode Schmertmann dan Nottingham (1975), de Ruiter dan Beringen (1979), serta Bustamante dan Gianceselli (1982), dan hasilnya dievaluasi terhadap uji beban dinamis menggunakan PDA di beberapa lokasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya dukung selimut tiang yang dianalisis menggunakan metode CAPWAP dari data PDA mendekati hasil dari metode Schmertmann dan Nottingham. Penelitian ini menegaskan bahwa hasil pengujian PDA umumnya memberikan faktor aman yang lebih besar dibandingkan dengan hasil analisis data CPT, dan merekomendasikan penggunaan lebih banyak data CPT untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.

Ahmad dan Surahman (2016) membandingkan perhitungan daya dukung tiang pancang dari hasil tes insitu (Sondir/CPT dan SPT), parameter laboratorium, dan formula dinamis dengan hasil pembebanan statis (static loading test kantledge). Penelitian ini mengumpulkan data dari proyek dan studi pustaka untuk menganalisis daya dukung tiang pancang menggunakan beberapa metode: metode Bagemann dan deRuiter & Beringen untuk data sondir, metode Meyerhof dan L. Decourt untuk data SPT, serta beberapa metode laboratorium dan formula dinamis seperti rumus Hiley, ENR, dan Janbu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ada perbedaan nilai daya dukung berdasarkan metode yang digunakan dan faktor aman yang diterapkan. Daya dukung aksial berdasarkan uji lapangan dan laboratorium sebaiknya dianggap sebagai perkiraan kasar dan dikonfirmasi dengan uji pembebanan statis. Studi ini menyimpulkan bahwa daya dukung tiang pancang yang diperoleh dari metode Bagemann, deRuiter & Beringen, Meyerhof, dan L. Decourt

memiliki perbedaan, dengan hasil yang paling aman dan menguntungkan berasal dari uji pembebanan statis yang menunjukkan kapasitas beban ultimit sebesar 300 ton dengan penurunan maksimum 20,41 mm

Penelitian Sari dan Musalamah (2020) membandingkan kapasitas daya dukung tiang pancang aksial tunggal menggunakan berbagai metode perhitungan statis dan dinamis terhadap hasil uji *Pile Driving Analyze* (PDA) pada proyek Jakarta Box Tower. Metode perhitungan statis yang digunakan meliputi metode Meyerhoff, Vesic,  $\alpha$  Thomlinson, dan  $\alpha$  Terzaghi, Peck dan Mesri, sedangkan perhitungan dinamis menggunakan catatan *jacking pile* pada saat instalasi tiang dengan alat *Hydrolic Pile Driver* (HSPD) dan uji *Pile Driving Analyze* (PDA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode Reese & Wright dengan SPT memiliki hasil uji PDA yang paling mendekati dengan persentase mencapai 82,83% untuk beberapa tiang, sementara penurunan terbesar terjadi pada tiang dengan metode Vesic, Terzaghi, Peck dan Mesri.

Penelitian oleh Ardiansyah dkk., (2023) bertujuan untuk membandingkan daya dukung pondasi tiang pancang menggunakan dua metode, yaitu *Drop Hammer* dan *Hydraulic Static Pile Driver* (HSPD), pada proyek pembangunan gedung Fakultas Teknologi Pertanian di Politeknik Jember. Penelitian ini menggunakan data *Standard Penetration Test* (SPT) dari dua titik penyelidikan tanah dan menghitung daya dukung tanah menggunakan asumsi *Drop Hammer* dan analisis CAPWAP dari hasil uji *Pile Driving Analyzer* (PDA) untuk metode HSPD. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan daya dukung antara kedua metode tersebut, di mana HSPD memberikan daya dukung ijin yang lebih tinggi untuk spun pile D 50 cm sedalam 12 m sebesar 68 ton, sementara *drop hammer* memberikan daya dukung ijin untuk mini pile 25 x 25 cm sedalam 6 m sebesar 40,94 ton. Penelitian ini menyarankan penggunaan kedua alat berat

tersebut secara bersamaan untuk efisiensi waktu dan biaya, serta menyarankan perencanaan pekerjaan parit untuk mengurangi getaran saat menggunakan Drop Hammer di dekat kawasan penduduk

### ***Perbedaan penelitian yang dilakukan dengan penelitian terdahulu***

Penelitian tentang daya dukung aksial pondasi tiang pancang di tanah lempung telah dilakukan oleh banyak peneliti dengan berbagai metode dan pendekatan. Penelitian terdahulu telah memberikan kontribusi signifikan dalam memahami karakteristik daya dukung tiang pancang pada berbagai kondisi tanah lempung. Penelitian ini berbeda dari penelitian terdahulu karena fokusnya pada evaluasi daya dukung aksial pondasi tiang pancang di tanah lempung daerah Cakung, Jakarta Timur, menggunakan kombinasi metode pengukuran langsung yang didapatkan melalui alat HSPD, analisis data dari uji SPT, dan uji PDA. Pendekatan ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang karakteristik tanah lempung di daerah Cakung, Jakarta Timur dan kinerja pondasi tiang pancang.

### **Metode Penelitian**

Penelitian ini dirancang untuk melakukan evaluasi terhadap daya dukung aksial pondasi tiang pancang pada tanah lempung yang berlokasi di daerah Cakung, Jakarta Timur. Metode penelitian melibatkan pengumpulan data langsung dari lapangan pada saat proses pemancangan menggunakan alat *Hydraulic Static Pile Driver* (HSPD). Manometer pada alat HSPD digunakan untuk mengukur tekanan hidrolik selama proses instalasi tiang pancang, dan mendapatkan daya dukung aksial pondasi saat proses instalasi selesai. Data hasil penyelidikan tanah dari uji Standard Penetration Test (SPT) dan uji laboratorium dari *core box* pada saat uji SPT digunakan untuk memahami karakteristik tanah di lokasi penelitian, serta melakukan *back calculate* nilai *undrained shear strength* ( $S_u$ ) berdasarkan daya dukung HSPD dan

Data hasil uji *Pile Driver Analyzer* (PDA) yang diperoleh. Analisis data yang mendalam termasuk analisis statistik untuk mengevaluasi daya dukung aksial pondasi tiang pancang pada tanah lempung di daerah Cakung, Jakarta Timur.

### ***Persiapan dan pengumpulan data***

Penelitian ini dimulai dengan menentukan lokasi penelitian, yaitu di proyek gedung tiga lantai di daerah Cakung, Jakarta Timur yang memiliki jenis tanah lempung. Data yang dikumpulkan adalah data penyelidikan tanah *Standard Penetration Test* (SPT), data hasil uji *core box*, data kedalaman tiang terinstal serta tekanan pada manometer HSPD, dan data hasil uji PDA yang telah dilakukan.

### ***Analisis data***

Data manometer berupa tekanan hidrolik piston pada alat HSPD digunakan untuk mengetahui daya dukung aksial pondasi pada saat instalasi tiang.

Data uji SPT digunakan untuk mengetahui daya dukung aksial pondasi melalui perhitungan numerik tiang pancang pada tanah lempung pada kedalaman yang ditinjau, serta melakukan perhitungan balik (*back calculate*) untuk mengevaluasi nilai *undrained shear strength* ( $C_u$ ) pada kedalaman pondasi yang telah terpasang.

Data uji laboratorium dari *core box* digunakan untuk menganalisis nilai *undrained shear strength* ( $C_u$ ) berdasarkan karakteristik tanah yang diperoleh dari penelitian ini, serta mengetahui pendekatan nilainya dengan nilai N-SPT yang ada.

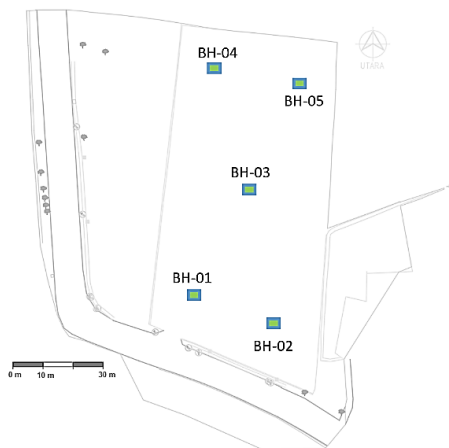
Data uji PDA digunakan untuk melakukan perhitungan balik (*back calculate*) dalam mengevaluasi nilai *undrained shear strength* ( $C_u$ ) dan membandingkannya dengan hasil evaluasi nilai *undrained shear strength* ( $C_u$ ) yang didapatkan dari data manometer pada HSPD.

**Analisis dan Pembahasan**

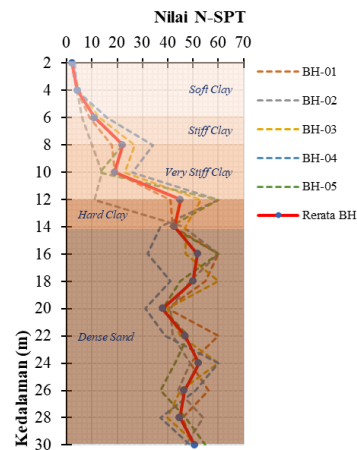
**Hasil sifat fisik dan properti tanah**

Data hasil penyelidikan tanah melalui uji *Standard Penetration Test* (SPT) memberi-

kan gambaran mendetail tentang sifat fisik dan properti mekanik tanah di lokasi penelitian. Hasil penyelidikan tanah berupa SPT dapat terlihat pada Gambar 3.



(a)



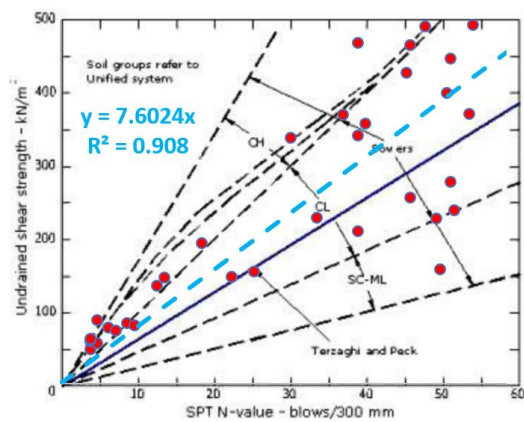
(b)

Gambar 3. (a) Denah dan (b) Grafik Hasil Penyelidikan Tanah (SPT)

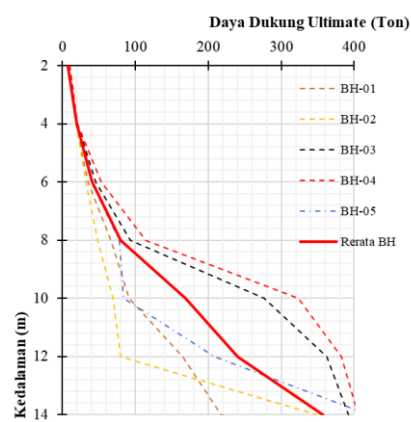
**Daya dukung berdasarkan data SPT**

Analisis data SPT menunjukkan variasi daya dukung tanah relatif pada kedalaman yang berbeda di lokasi penelitian. Grafik profil daya dukung berdasarkan nilai N-SPT memberikan informasi tentang zona-zona dengan kekuatan tanah yang berbeda, yang menjadi faktor penting dalam menentukan kedalaman instalasi tiang pancang untuk mencapai target daya dukung yang diinginkan.

Pondasi *square pile* 40 cm x 40 cm, serta daya dukung *ultimate* pondasi dihitung dengan menggunakan metode American Petroleum Institute (1987) dan metode Meyerhof (1976) berdasarkan data N-SPT yang telah didapatkan. Nilai  $C_u$  ditentukan berdasarkan data tanah, kemudian dilakukan pendekatan nilai korelasi antara nilai N-SPT dan nilai  $C_u$  seperti terlihat pada Gambar 4.



(a)



(b)

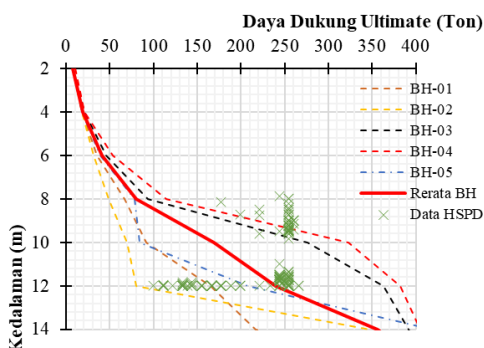
Gambar 4. Hasil (a) Korelasi Nilai  $C_u$  dan Nilai N, serta (b) Analisis Daya Dukung Ultimate

Gambar 4 menunjukkan dua analisis utama mengenai hasil penyelidikan tanah yaitu (a) korelasi antara nilai *undrained shear strength* ( $C_u$ ) dan nilai N-SPT, serta (b) analisis daya dukung ultimate pondasi tiang pancang *square pile* 40 cm x 40 cm seperti yang telah terpasang di lapangan dengan modular panjang 12 m. Hasil korelasi yang cukup kuat berdasarkan analisis regresi linier antara nilai  $C_u$  dan N-SPT didapatkan sebesar 7,6024 N, dengan nilai  $R^2$  sebesar 0.91.

Instalasi pemancangan menggunakan metode *jack-in pile* dengan alat HSPD berkapasitas 240 ton, sehingga pengamatan pada penelitian terbatas pada kedalaman 14 m dengan daya dukung tidak jauh dari kapasitas maksimum alat HSPD, yaitu 240 ton. Gambar 4 (b) menunjukkan pada kedalaman rencana 12 m daya dukung pondasi sangat bervariasi mulai dari 80 hingga 380 ton. Sehingga sangat wajar jika ada titik pemancangan yang tidak dapat menembus hingga kedalaman 12 m, terutama titik-titik pemancangan yang relatif dekat dengan BH-04 dan BH-03.

**Daya dukung berdasarkan data tekanan manometer pada alat HSPD**

Analisis data tekanan hidrolik manometer pada alat HSPD dapat menggambarkan daya dukung aksial yang terjadi pada saat instalasi tiang pancang. Data daya dukung aksial pondasi berdasarkan tekanan pada alat HSPD dapat terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Data Daya Dukung Aksial berdasarkan Manometer pada Alat HSPD kapasitas 240 ton

Seperti terlihat pada Gambar 5, titik pondasi yang relatif dekat dengan titik BH-04 dan BH-03 tidak dapat terinstal sampai dengan kedalaman 12 m, dikarenakan daya dukung pada kedalaman sebelum 12 m telah melebihi kapasitas alat HSPD yang digunakan. Sedangkan untuk titik lainnya relatif mudah untuk mencapai kedalaman 12 m, dikarenakan daya dukung pada kedalaman tersebut masih dapat ter-cover oleh kapasitas alat HSPD yang digunakan.

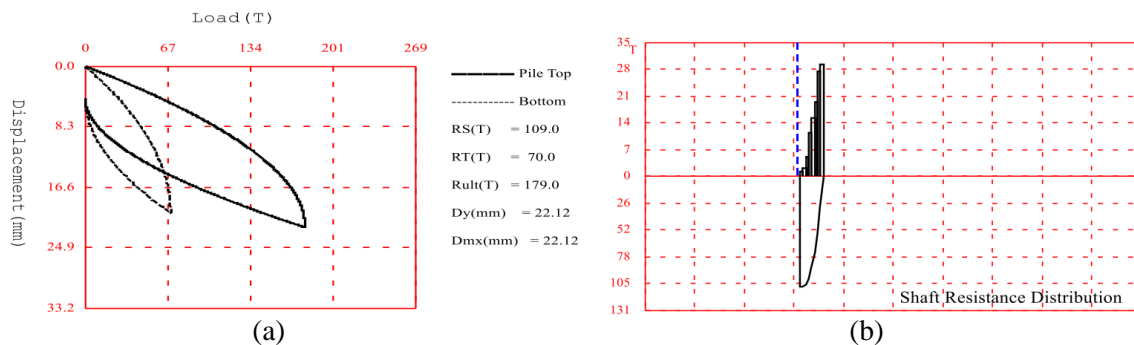
**Daya dukung berdasarkan hasil PDA test**

Hasil PDA Test pada 4 titik setelah instalasi tiang pancang dengan metode *jack-in pile* dengan alat HSPD berkapasitas 240 ton dilakukan untuk memvalidasi daya dukung aksial dari tiang yang telah terinstal, serta melihat perubahan daya dukung yang terjadi setelah hari pasca-instalasi tiang pondasi. Perbandingan daya dukung pada saat instalasi berdasarkan pembacaan manometer pada alat HSPD dan daya dukung pada saat dilakukannya PDA test dapat terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Daya Dukung berdasarkan alat HSPD dan Hasil Uji PDA

Titik Pondasi	Daya Dukung HSPD (Ton)	Daya Dukung PDA Test (Ton)	Jumlah Hari Pasca Instalasi	Selisih Daya Dukung (Ton)
Grid L - 5	243.98	248	21	4.02
Grid A - 5	99.81	179	19	79.19
Grid K - 1	255.07	259	17	3.93
Grid G - 2	255.07	271	8	15.93

Berdasarkan pada Tabel 2, kenaikan nilai daya dukung yang sangat signifikan terjadi pada titik pondasi grid A-5, yaitu sebesar 79.19 ton. Titik tersebut relatif sangat dekat dengan titik BH-02, sehingga wajar jika nilai daya dukung pada titik tersebut adalah yang relatif lebih rendah dari nilai daya dukung yang lainnya. Adanya kenaikan nilai daya dukung pada titik tersebut terjadi karena pengaruh friksi yang bertambah berdasarkan hasil analisis CAPWAP pada uji PDA seperti terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik (a) Load-Displacement dan (b) Shaft Resistance Distributin berdasarkan Hasil Analisa CAPWAP pada Uji PDA Tiang Pancang di Grid A-5

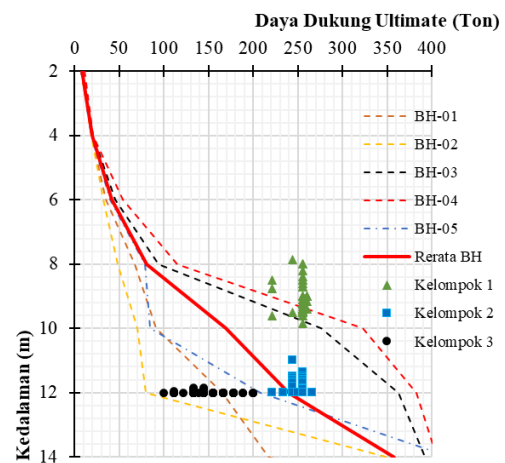
Hasil analisis CAPWAP pada tiang A-5 menunjukkan detail perilaku tiang pada saat dilakukan uji *Pile Driving Analyzer (PDA)*. Grafik (a) *load-displacement* menggambarkan hubungan antara beban dan perpindahan pada tiang, dengan kurva histeresis yang memberikan informasi tentang kapasitas dukung dan deformasi tiang. Nilai kapasitas dukung friksi (RS) teridentifikasi sebesar 109,0 ton dan kapasitas bearing (RT) teridentifikasi sebesar 70,0 ton menunjukkan bahwa kontribusi daya dukung aksial terbesar berasal dari friksi sepanjang batang tiang, sehingga total kapasitas dukung ultimate (Rult) dapat mencapai 179,0 ton. Selain itu, perpindahan maksimal (Dmax) teridentifikasi sebesar 22,12 mm, yang mengindikasikan deformasi yang terjadi di bawah beban maksimum.

Peningkatan daya dukung pasca-instalasi dapat terjadi dikarenakan berbagai faktor, salah satunya adalah karena adanya fase penurunan air pori yang non-linier seperti sebagaimana pada penelitian yang dilakukan oleh Dou dkk. (2021), mengingat pada area yang relatif dekat dengan BH-02 jenis tanah dibawah kedalaman 12 m teridentifikasi adalah merupakan tanah berjenis clay.

**Verifikasi nilai *undrained shear strength (C<sub>u</sub>)* berdasarkan data manometer HSPD**

Gambar 5 menunjukkan sebaran identifikasi daya dukung aksial pondasi berdasarkan data manometer HSPD, sehingga dapat dibagi menjadi 3 kelompok data sebelum dilakukan *back caluclating* terhadap nilai

*undrained shear strength (C<sub>u</sub>)* seperti terlihat pada Gambar 7.

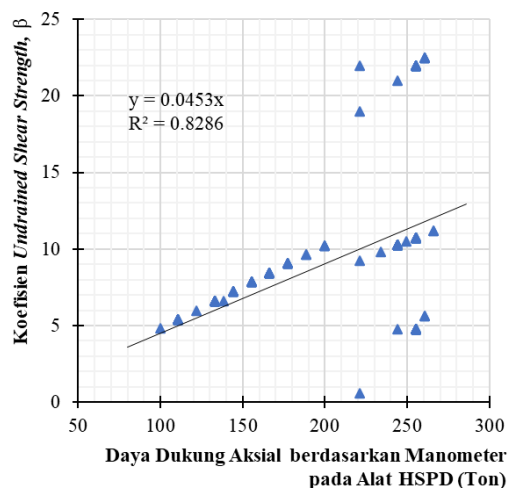


Gambar 7. Pengelompokan data daya dukung pondasi tiang pancang berdasarkan data tekanan manometer HSPD

Pengelompokan data pada Gambar 7 merupakan daya dukung ultimate dari lubang bor (BH-01 hingga BH-05) di berbagai variasi kedalaman, dengan garis merah tebal mewakili rata-rata daya dukung ultimate pada semua titik bor SPT. Pengelompokan data ini dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu: Kelompok 1 menunjukkan daya dukung ultimate yang tinggi pada kedalaman 8 hingga 10 meter, mengindikasikan zona tanah yang lebih kuat. Kelompok 2 menunjukkan variasi daya dukung pada kedalaman 11 m hingga 12 m, dengan nilai yang relatif masih tinggi. Kelompok 3 menunjukkan daya dukung ultimate pada kedalaman disekitar 12 m dengan nilai yang lebih rendah dari

kelompok 1 dan kelompok 2. Pengelompokan ini dilakukan untuk mengidentifikasi posisi tiang berdasarkan pendekatan daya dukung aksial teoritis yang telah terhitung. Sehingga, *back calculating* nilai *undrained shear strength* ( $C_u$ ) dapat dilakukan berdasarkan acuan data SPT yang relatif mendekati masing-masing kelompok.

Berdasarkan pengelompokan data daya dukung aksial yang telah dilakukan, maka dapat diketahui hubungan antara daya dukung aksial berdasarkan alat HSPD dan *undrained shear strength* seperti terlihat pada Gambar 8.

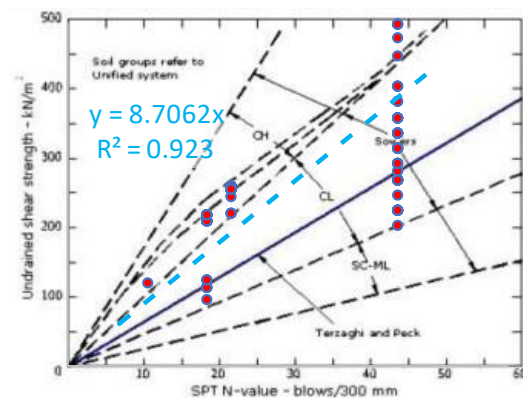


Gambar 8. Grafik hubungan daya dukung aksial berdasarkan alat HSPD dan nilai koefisien *undrained shear strength* ( $\beta$ )

Grafik pada Gambar 8 menunjukkan hubungan antara daya dukung aksial yang diukur dengan manometer pada alat HSPD dan koefisien *undrained shear strength* ( $\beta$ ). Persamaan regresi linier yang dihasilkan adalah  $y = 0.0453x$  dengan koefisien determinasi  $R^2 = 0.8286$ . Nilai  $R^2$  sebesar 0.8286 menunjukkan bahwa terdapat korelasi yang kuat antara daya dukung aksial dan  $\beta$ , dengan sekitar 82.86% variabilitas dalam  $\beta$  dapat dijelaskan oleh daya dukung aksial. Mayoritas data berkumpul di sekitar garis regresi, mengindikasikan bahwa data yang diukur konsisten dengan model linier yang diusulkan. Namun, terdapat beberapa titik yang menyimpang, terutama pada nilai

daya dukung aksial yang lebih tinggi, yang mungkin disebabkan oleh variasi dalam karakteristik tanah atau keakuratan pengukuran pada kondisi tersebut.

Berdasarkan nilai korelasi yang telah didapatkan dari Gambar 8, maka dapat ditentukan nilai N-SPT berdasarkan titik terdekat beserta nilai *undrained shear strength* ( $C_u$ ) pada setiap titik tiang, sehingga dapat diidentifikasi hubungan antara N-SPT dan *undrained shear strength* ( $C_u$ ) berdasarkan pengukuran lapangan melalui manometer pada alat HSPD seperti terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik hubungan N-SPT dan *undrained shear strength* ( $C_u$ ) berdasarkan hasil evaluasi menggunakan data HSPD.

Hubungan yang kuat antara nilai N-SPT dan  $C_u$  berdasarkan hasil evaluasi menggunakan data HSPD dengan koefisien determinasi  $R^2=0.923$  menunjukkan bahwa hasil evaluasi berdasarkan data HSPD memberikan hasil yang lebih akurat dan lebih konsisten terhadap nilai *undrained shear strength* ( $C_u$ ).

Secara keseluruhan, perbandingan antara penentuan nilai  $C_u$  dengan data penyelidikan tanah dan data tekanan manometer HSPD menunjukkan bahwa evaluasi data menggunakan data manometer pada alat HSPD dapat meningkatkan keakuratan dan konsistensi dalam prediksi nilai  $C_u$  dibandingkan dengan metode penentuan nilai  $C_u$  menggunakan data penyelidikan tanah. Hal ini penting karena prediksi  $C_u$  yang akurat sangat krusial untuk perancangan pondasi

yang aman dan efisien, terutama dalam kondisi tanah yang bervariasi dan kompleks. Penggunaan alat HSPD memungkinkan pengukuran *real-time* yang lebih presisi, mengurangi kesalahan dan variasi yang mungkin terjadi. Dengan demikian, hasil ini memberikan dukungan kuat untuk adopsi evaluasi geoteknik secara *real-time* pada saat proses pemancangan menggunakan alat HSPD dan perancangan pondasi, khususnya pada kondisi tanah lempung.

## Kesimpulan dan Saran

### Kesimpulan

Evaluasi daya dukung aksial pondasi tiang pancang pada tanah lempung di daerah Cakung, Jakarta Timur, dengan menggunakan data tekanan manometer pada alat HSPD, analisis data dari uji SPT, dan uji PDA telah dilakukan dengan hasil berikut. Variasi daya dukung aksial yang signifikan ditemukan pada kedalaman yang berbeda, dengan nilai daya dukung yang bervariasi pada kedalaman 8 m hingga 12 meter.

Titik-titik pondasi yang dekat dengan BH-04 dan BH-03 mengalami kesulitan mencapai kedalaman 12 m karena daya dukung tanah sebelum kedalaman tersebut telah melebihi kapasitas alat HSPD. Peningkatan daya dukung pasca-instalasi yang signifikan ditemukan melalui uji PDA, dengan peningkatan sebesar 79,19 ton pada titik pondasi grid A-5 setelah 19 hari pasca-instalasi, disebabkan oleh efek friksi yang bertambah seiring waktu. Korelasi kuat antara data manometer HSPD dan nilai undrained shear strength ( $C_u$ ) memungkinkan identifikasi yang lebih tepat terhadap zona tanah dengan karakteristik daya dukung yang berbeda, dengan koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0.8286.

Penggunaan data manometer HSPD untuk evaluasi daya dukung pondasi memberikan hasil yang lebih akurat dan konsisten dibandingkan metode konvensional yang hanya mengandalkan data penyelidikan tanah. Penggunaan alat HSPD dalam proses instalasi tiang pancang tidak hanya memberikan kontrol yang lebih baik

terhadap posisi dan kedalaman tiang, tetapi juga mengurangi dampak getaran dan kebisingan, sehingga lebih cocok untuk digunakan di daerah perkotaan yang padat. Uji PDA memberikan validasi terhadap data tekanan hidrolis dari HSPD dan menunjukkan peningkatan daya dukung pasca-instalasi, yang penting untuk memastikan keamanan dan stabilitas struktur bangunan.

### Rekomendasi

Penggunaan alat HSPD dalam proses instalasi tiang pancang direkomendasikan untuk proyek konstruksi di daerah dengan karakteristik tanah yang serupa, karena memberikan kontrol yang lebih baik terhadap posisi dan kedalaman tiang serta mengurangi dampak getaran.

Diperlukan pengujian lebih lanjut dengan metode statis dan dinamis untuk memperkuat hasil evaluasi daya dukung pondasi.

Disarankan untuk melakukan penelitian lanjutan dengan memperluas area studi untuk mendapatkan data yang lebih komprehensif mengenai variasi daya dukung pada berbagai kondisi tanah lempung.

### Ucapan terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Pola Data Consultant, Universitas Islam Indonesia, serta semua pihak yang telah membantu penelitian ini. Terima kasih juga kepada semua rekan dan keluarga yang telah memberi dukungan selama penelitian ini.

### Daftar Pustaka

- Ahmad, L. G., & Surahman, M. (2016). Analisis Daya Dukung Tiang Pancang Menggunakan Data Insitu Test, Parameter Laboratorium Terhadap Loading Test Kantledge. *Jurnal Konstruksia*, 7(2), 65–74.
- Ajayi, L. A., & Balogun, L. A. (1988). The use of the standard penetration test (SPT) in foundation design on residual soils in Nigeria. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 21(3), 139–147.
- American Petroleum Institute. (1987). *API Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore*

- Platforms - Load and Resistance Factor Design (API RP 2A-LRFD)*. API Publishing Services.
- Ardiansyah, M. E., Aliehudien, A., & Gunasti, A. (2023). Perbandingan Daya Dukung Tiang Pancang dengan Alat Berat Drop Hammer dan Hydraulic Static Pile Driver (HSPD). *UMJember Proceeding Series*, 2(5). <https://doi.org/10.47134/scbmej.v1i1.2152>
- Bachtiar, V. (2012). Evaluasi Daya Dukung Tiang Pancang Berdasarkan Data Cone Penetration Test (CPT) Dan Pile Driven Analyzer (PDA) Pada Tanah Lunak Di Kota Pontianak. *Jurnal Teknik Sipil UNTAN*, 12(1).
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design*. McGraw-Hill.
- Coduto, D. P., Kitch, W. A., & Yeung, M. R. (2014). *Foundation Design: Principles and Practices*.
- Craig, R. F. (2004). *Craig's Soil Mechanics, Seventh Edition* (7th ed.).
- Das, B. M. (2011). *Principles of Foundation Engineering, SI* (Hilda Gowans (ed.); 7th ed.). Cengage Learning.
- Dou, J., Chen, J., Liao, C., Sun, M., & Han, L. (2021). Study on the Correlation between Soil Consolidation and Pile Set-Up Considering Pile Installation Effect. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(7), 705. <https://doi.org/10.3390/jmse9070705>
- Fellenius, B. H. (2023). *Basics of Foundation Design*. Electronic Edition. [www.Fellenius.net](http://www.Fellenius.net),
- Hara, A., Ohta, T., Niwa, M., Tanaka, S., & Banno, T. (1974). Shear modulus and shear strength of cohesive soils. *Soils and Foundations*, 14(3), 1–12.
- Hettiarachchi, & Brown. (2009). Use of SPT blow counts to estimate shear strength properties of soils: Energy balance approach. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(6), 830–834.
- Jawat, W. (2016). Metode Pelaksanaan Pekerjaan Tiang Pancang Sistem Hidraulic Jack In (Studi: Proyek KCU BCA Sunset Road Bali). *PADURAKSA*, 5(1).
- Meyerhof, G. G. (1976). Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 102(3), 197–228.
- Mina, E., & Kusuma, R. I. (2014). Studi Korelasi Empiris Antara Nilai Tahanan Standard Penetration Test (N Spt) Dengan Kekuatan Geser Undrained (Su) Tanah Kohesif Kota Cilegon. *TEKNIKA*, 10(1).
- Nixon, I. K. (1982). Standard penetration test: State of the art report. *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*.
- Primaswari, G., Bhakti Utama, A., Taurano, G. A., Program, D., Teknologi, S., Jalan, K., Jembatan, D., Umum, P., Konstruksi, S. T., Gedung, B., Soedarto, J. H., & Semarang, S. T. (2022). Produktivitas Hydraulic Static Pile Driver Pada Proyek Pembangunan Workshop Di Semarang. *ORBITH*, 18(1), 11–21.
- Puspita Sari, E. & Musalamah S., (2020). Analisis Daya Dukung Tiang Aksial Tunggal Dengan Metode Statis Dan Dinamis Terhadap Hasil Uji Pile Driving Analyze (PDA) Pada Pekerjaan Pondasi Proyek Jakarta Box Tower. *Menara: Jurnal Teknik Sipil*, XIV(2).
- Sanglerat, G. (1972). *The Penetration and Soil Exploration: Interpretation of Penetration Diagrams - Theory and Practice*. Elsevier Publishing Co.
- Showers, G. E. (1979). *Introductory Soil Mechanics and Foundations: Geotechnical Engineering*. Macmillan.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Son.
- Tomlinson, M., & Woodward, J. (2008). *Pile Design and Construction Practice*. Taylor & Francis.