

Analisis Daya Dukung Fondasi Tiang Pancang menggunakan Metode Analitik dan Metode Elemen Hingga

Zakwan Gusnadi^{a*}, Dina Sekar Arum^a, Asrinia Desilia^b, Herwan Dermawan^b dan Iman Handiman^a

^aJurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Siliwangi, Tasikmalaya, Indonesia 46115

^bProdi Teknik Sipil, Fakultas Pendidikan Teknologi dan Industri, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia 40154

* Corresponding author's e-mail: zakwangusnadi@unsil.ac.id

Received: 1 October 2025; revised: 3 February 2026; accepted: 8 February 2026

Abstract: Pile foundations are one type of deep foundation widely used in high-rise building construction and heavy infrastructure, especially in areas with low-bearing soil conditions. This study aims to analyze the ultimate bearing capacity (Q_{ult}) of axial and lateral piles using analytical methods, finite element methods (FEM), and comparing them with the results of static axial load tests in the field. The data used includes SPT test results, laboratory data, and static load test (SLT) results. The analytical methods include the Meyerhof and Alpha approaches for axial bearing capacity and the Broms method for lateral bearing capacity. FEM modeling was performed using 2D FEM software. Soil interpretation from BH-1 and BH-3 indicates the presence of soft clay layers up to a depth of 22–24 m with a layer of dense sand below. SLT indicates TP-03 has the lowest Q_{ult} (190 tons), but analytical analysis shows the highest Q_{ult} (279 tons). Elastic settlement at all test points remains within safe limits based on the Vesic approach. Lateral Q_{ult} at all piles demonstrates good performance against 12 mm and 25 mm deflections, with optimal performance at TP-03 and TP-05. FEM analysis shows the maximum settlement at TP-03 (18.04 mm) and the highest axial Q_{ult} at TP-05 (201 tons), with a safety factor >2 for all piles. FEM provides the closest estimate to field test results (SLT), while the analytical method yields higher values. In lateral analysis, the analytical method showed larger results than FEM, with the largest difference of 212.35 kN on TP-03. This study provides an important contribution to the selection of analysis methods and pile foundation design on low-quality clay soil.

Keywords: *pile foundation, axial bearing capacity, lateral bearing capacity, analytical method, finite element method, static load test*

Abstrak: Fondasi tiang pancang merupakan salah satu jenis fondasi dalam yang digunakan pada konstruksi gedung bertingkat dan infrastruktur berat, terutama pada kondisi tanah yang memiliki daya dukung cukup rendah. Penelitian ini bertujuan menganalisis daya dukung ultimit (Q_{ult}) aksial dan lateral tiang pancang menggunakan pendekatan metode analitik, metode elemen hingga (MEH), serta membandingkannya dengan hasil uji beban aksial statik di lapangan. Data yang digunakan meliputi hasil uji SPT, data laboratorium, dan *static load test* (SLT). Metode analitik mencakup pendekatan Meyerhof dan Alpha untuk daya dukung aksial, serta metode Broms untuk daya dukung lateral. Pemodelan MEH dilakukan menggunakan perangkat lunak elemen hingga 2D. Interpretasi tanah dari BH-1 dan BH-3 menunjukkan adanya lapisan lempung lunak hingga kedalaman 22–24 m dengan lapisan pasir padat di bawahnya. SLT menunjukkan TP-03 memiliki Q_{ult} terendah (190 ton), namun analisis analitik menunjukkan Q_{ult} tertinggi (279 ton). Penurunan elastis di semua titik uji masih dalam batas aman berdasarkan pendekatan Vesic. Q_{ult} lateral pada semua tiang menunjukkan kinerja baik terhadap defleksi 12 mm dan 25 mm, dengan performa optimal pada TP-03 dan TP-05. Analisis MEH menunjukkan penurunan maksimum pada TP-03 (18,04 mm) dan Q_{ult} aksial tertinggi pada TP-05 (201 ton), dengan faktor keamanan >2 untuk seluruh tiang. MEH menghasilkan estimasi paling mendekati hasil uji lapangan (SLT), sedangkan metode analitik memberikan nilai lebih tinggi. Pada analisis lateral, metode analitik menunjukkan hasil lebih besar dari MEH, dengan selisih terbesar 121,35 kN pada TP-03. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pemilihan metode analisis dan perencanaan fondasi tiang pancang pada tanah lempung dengan daya dukung rendah.

Kata kunci: *fondasi tiang pancang, daya dukung aksial, daya dukung lateral, metode analitik, metode elemen hingga, uji beban statik*

1. Pendahuluan

Permasalahan geoteknik pada tanah lunak sangat mempengaruhi desain fondasi struktur. Di wilayah Jawa Timur, cukup banyak ditemukan lapisan lempung lunak yang memiliki daya dukung rendah dan kompresibilitas tinggi. Oleh karena itu, penggunaan fondasi tiang pancang merupakan salah satu pilihan yang umum dan tepat untuk mentransfer beban struktur ke lapisan tanah yang lebih stabil [1]. Dalam perencanaan fondasi tiang pancang, analisis daya dukung menjadi faktor utama yang menentukan keamanan dan efisiensi struktur [2]. Daya dukung ini dipengaruhi oleh karakteristik tanah, jenis, material tiang, serta metode analisis yang digunakan [2]. Fondasi dalam dibangun dimulai dari atas permukaan bumi

sampai tanah yang keras guna untuk menopang dan mentransfer berat fondasi dan berat struktur di atasnya [3].

Tanah lempung adalah jenis tanah yang bersifat kohesif dan plastis, sedang pasir digambarkan sebagai tanah yang non-kohesif dan non-plastis [4]. Menurut Budhu, sifat fisik tanah merupakan faktor utama dalam menentukan daya dukung tanah serta respons tanah terhadap pembebanan eksternal [5]. Untuk mengetahui karakteristik dan jenis tanah diperlukan penyelidikan tanah dengan tujuan untuk mengetahui gambaran lapisan tanah dan parameter tanah [6]. Oleh karena itu, penelitian ini akan membahas mengenai analisis daya dukung aksial fondasi tiang pancang menggunakan 2 metode yang bertujuan mengetahui metode mana yang paling mendekati nilai sesuai kondisi lapangan. Perilaku tanah dengan struktur bersifat non-linear

dipengaruhi tahapan konstruksi serta kontak tiang-tanah, sehingga hasil analitik dapat berbeda signifikan terhadap kondisi lapangan [7].

Analisis daya dukung dilakukan dengan berbagai pendekatan. Metode analitik seperti Meyerhof, metode α (alpha) dan metode β (betha) untuk memperhitungkan daya dukung aksial [8]. Sementara metode Broms digunakan untuk menganalisis kapasitas lateral tiang [8]. Pada hasil perhitungan metode analitik sering kali bersifat konservatif atau terlalu tinggi apabila dibandingkan dengan kondisi di lapangan [9]. Maka dari itu, metode numerik berbasis elemen hingga (MEH) mulai banyak digunakan karena mampu memodelkan perilaku-struktur yang lebih realistis [10]. Pemenuhan daya dukung fondasi diperlukan keamanan terhadap penurunan agar fondasi dapat dinyatakan aman terhadap beban kerja yang terjadi [11]. Pada sisi lain, pemilihan dimensi tiang terbukti mempengaruhi kapasitas dukung dan kebutuhan tiang perlu dipertimbangkan sejak tahap perencanaan [12].

Selain analisis secara teoritis, pendekatan analitik/konvensional relatif sederhana misalnya perhitungan berbasis data SPT untuk memperoleh kapasitas tiang dan kemudian dibandingkan hasil pengujian dinamis [13]. Terdapat uji pembebanan di lapangan seperti *static load test* (SLT) menjadi acuan untuk mengevaluasi daya dukung tiang secara langsung [14]. Ada beberapa metode yang dipakai mulai dari metode Davisson, Mazurkiewicz, dan Chin. Setiap metode menghasilkan nilai daya dukung ultimit yang berbeda, sehingga diperlukan evaluasi lebih lanjut untuk menentukan metode yang paling sesuai [14]. Pengujian dinamis cukup akurat untuk mengonfirmasi kapasitas tiang terpasang. Namun, karena perhitungan data laboratorium maupun dinamis bersifat estimasi, uji beban statik tetap menjadi rujukan untuk mengetahui akurasi kapasitas ultimit yang mendekati kondisi aktual di lapangan, sekaligus menjadi dasar pembandingan untuk menilai tingkat keamanan metode analitik maupun pemodelan numerik [15].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis daya dukung ultimit (Q_{ult}) aksial dan lateral fondasi tiang pancang pada tanah lempung lunak menggunakan metode analitik, metode elemen hingga, serta uji beban aksial statik guna mengevaluasi tingkat kesesuaian dan validitas metode terhadap kondisi lapangan. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi dalam memberikan dasar pemilihan metode analisis daya dukung fondasi tiang pancang yang paling representatif terhadap kondisi lapangan, sehingga dapat meningkatkan akurasi perencanaan, efisiensi desain, serta keselamatan struktur pada tanah dengan daya dukung rendah.

2. Metode Penelitian

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini dilakukan di Provinsi Jawa Timur. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada beberapa pertimbangan antara lain relevansi terhadap objek penelitian dan ketersediaan data yang dibutuhkan terhadap lokasi tersebut. Lokasi dapat dilihat pada Gambar 1.



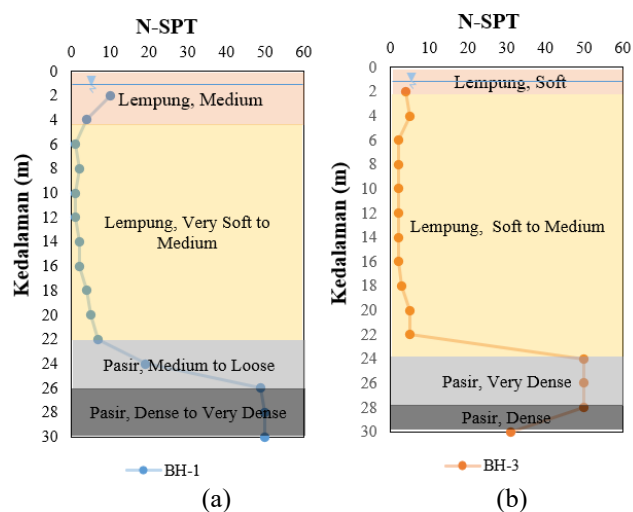
Gambar 1. Peta lokasi penelitian

2.2 Pengumpulan Data Tanah

Data diperoleh dari hasil pengujian *standar penetration test* (SPT) di lapangan. Terdapat 2 (dua) titik pengujian SPT yang dilakukan pada lokasi penelitian. Tabel 1 adalah nilai N-SPT pada setiap titik penyelidikan tanah. Gambar 2 adalah simplifikasi jenis tanah berdasarkan hasil penyelidikan tanah.

Tabel 1. Nilai SPT berdasarkan hasil pengujian lapangan

Kedalaman (m)	N-SPT	
	BH-1	BH-3
0		
2	10	4
4	4	5
6	1	2
8	2	2
10	1	2
12	1	2
14	2	2
16	2	2
18	4	3
20	5	5
22	7	5
24	19	50
26	49	50
28	50	50
30	50	31



Gambar 2. Simplifikasi jenis tanah (a) BH-1 dan (b) BH-3

2.3 Tahapan Penelitian

Penelitian dilakukan dengan tahapan awal penentuan lokasi penelitian dan pengumpulan data. Data yang

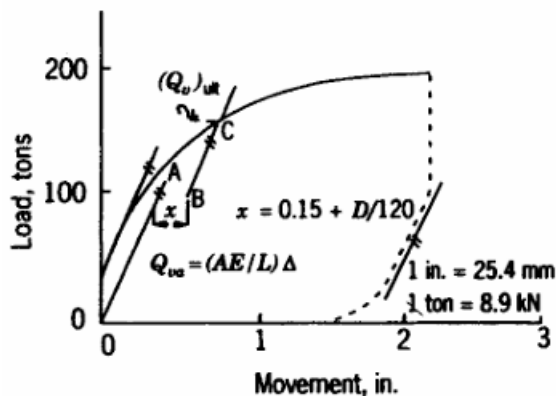
diperoleh kemudian dianalisis untuk memperoleh nilai parameter-parameter tanah yang dibutuhkan untuk penentuan nilai daya dukung tiang pancang. Kemudian untuk data hasil pengujian SLT dilakukan interpretasi daya dukung menggunakan metode Davisson, Mazurkiewick dan Chin. Serta perhitungan menggunakan aplikasi geoteknik menggunakan metode elemen hingga.

1) Analisa Parameter Tanah

Analisa interpretasi data tanah merupakan langkah awal dari penelitian ini guna mendapatkan nilai parameter-parameter yang dibutuhkan. Parameter-parameter tersebut yang nantinya akan digunakan untuk mencari daya dukung tanah dan penurunan yang terjadi. interpretasi data tanah dilakukan pada setiap titik uji penyelidikan tanah yaitu pada BH-2 dan BH-3. Kemudian untuk parameter tanah ditentukan 2 cara yaitu data laboratorium dan korelasi N-SPT. Penentuan syarat-syarat perhitungan berdasarkan teori yang tercantum pada SNI 8460 tahun 2017. Menurut Murthy, (2019) dalam *Soil Mechanics in Engineering Practice* menjelaskan bahwa sifat mekanis tanah menentukan kapasitas tanah dalam menahan beban serta stabilitas terhadap gaya geser [16]. Acuan korelasi parameter tanah terdapat pada buku Burt Look, 2015 [17].

2) Analisa Data Hasil Pengujian Tiang

Analisis bertujuan membandingkan hasil daya dukung aksial tanah dan penurunan dengan mengevaluasi data hasil uji pembebanan aksial statik. Metode ini menggunakan pendekatan titik belok pada kurva beban-penurunan. Metode ini menggunakan hubungan antara penurunan (s) dan beban (Q). uji statik tidak dapat menunjukkan respons tiang pada selimut dan ujungnya serta besaran daya dukung [1]. Terdapat 3 metode dalam interpretasi hasil uji beban aksial statik yaitu, metode Davisson, Mazurkiewick, dan Chin.



Gambar 3. kurva hubungan beban dan penurunan Metode Davisson [9]

Dari **Gambar 3** penurunan elastik dapat dihitung dengan rumus [1] sebagai berikut:

$$\frac{Se}{Q} = \frac{L}{A_p \times E_p} \quad (1)$$

dengan:

Se = penurunan elastis

Q = beban uji yang diberikan

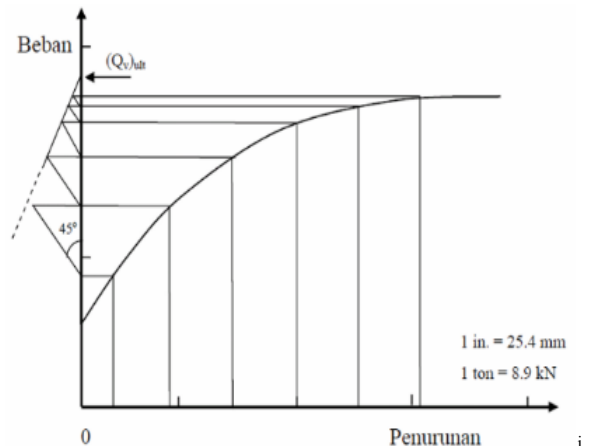
L = panjang tiang

= luas penampang tiang

= modulus elastisitas tiang

X = $0.15 + D/120$ (dalam inchi) dengan D adalah diameter atau sisi tiang dalam satuan inchi.

Metode Mazurkiewick mengasumsikan kapasitas daya dukung didapatkan dari beban yang berpotongan beban yang searah sumbu tiang untuk dihubungkan beban dengan titik-titik dari posisi garis terhadap sudut 45° pada beban sumbu yang berbatasan dengan beban [9]. Dapat dilihat pada **Gambar 4** di bawah ini.



Gambar 4. Kurva hubungan beban dan penurunan Metode Mazurkiewick [10]

Metode Chin menggambarkan kurva antara rasio penurunan terhadap beban (s/Q) terhadap penurunan. Hubungan kurva dapat dilihat pada **Gambar 5**.

$$\frac{s}{Q} = c_1 \times s + c_2 \quad (2)$$

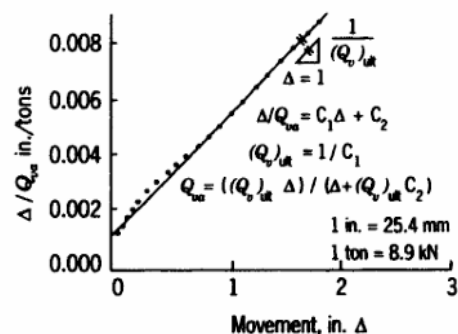
Beban ultimit adalah $1/c_1$.

dengan:

S = penurunan

Q = penambahan beban

C1 = kemiringan garis lurus



Gambar 5. hubungan beban dan penurunan Metode Chin [9]

3) Analisa Metode Analitik

Analisis ini bertujuan untuk memperoleh daya dukung fondasi tiang tunggal menggunakan metode analitik. Persamaan daya dukung selimut untuk lapisan tanah lempung menggunakan metode alpha.

$$Q_s = \sum \alpha c_u p \times \Delta L \quad (3)$$

dengan:

α = faktor adhesi
 c_u = kohesi tanah
 P = keliling tiang pancang
 ΔL = panjang lapisan tanah

Persamaan daya dukung selimut untuk lapisan tanah pasir menggunakan metode betha.

$$Q_s = \sum P \times \Delta l (\beta \times \sigma'_v) \quad (4)$$

dengan:

P = keliling tiang (m)
 Δl = panjang segmen tiang (m)
 β = koefisien betha
 σ'_v = tegangan vertikal efektif (kPa)

Persamaan daya dukung ujung untuk lapisan tanah lempung menggunakan metode Meyerhof.

$$q_p = (c \times N_c^*) \times A_p \quad (5)$$

c = kohesi (kN/m²)
 N_c^* = faktor daya dukung tanah
 A_p = luas tiang pancang rencana (m²)

Persamaan daya dukung ujung untuk lapisan tanah pasir menggunakan metode Meyerhof.

$$q_p = (q \times N_q^*) \leq q_l = 50 \times N_q^* \times \tan \phi \quad (6)$$

dengan:

q_p = unit tahanan ujung (kPa)
 q_l = batas unit tahanan ujung (kPa)
 N_q^* = faktor daya dukung tanah
 P_a = tekanan atmosfer (100 kPa)
 ϕ = sudut geser dalam tanah pada ujung tiang

Persamaan daya dukung lateral menggunakan persamaan dari metode Broms. Sebelum menghitung kapasitas daya dukung lateral tiang tunggal. Maka dilakukan penentuan apakah tiang termasuk ke dalam kriteria tiang pendek (short pile) apabila $L \leq 2T$ dan tiang panjang (long pile) apabila $L \geq 5T$. Penentuan berdasarkan faktor kekakuan R dan T

$$R = \sqrt[4]{\frac{EI}{K_h \times d}} \quad (7)$$

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p \times I_p}{n_h}} \quad (7)$$

dengan:

d = diameter tiang (m)
 R, T = faktor kekakuan relatif
 E_p = modulus elastisitas tiang (kN/m²)
 I_p = momen inersia tiang (m⁴)
 n_h = koefisien variasi modulus

Maka perhitungan kapasitas lateral tiang sebagai berikut.

$$Q_g = \frac{x_z(z=0)KDL}{y_0} \quad (7)$$

dengan:

Q_g = defleksi lateral
 x_z = defleksi izin (m)
 K = modulus elastisitas horizontal
 D = diameter tiang (m)
 L = panjang tiang (m)
 y_0 = defleksi tiang

Defleksi lateral yang diizinkan berdasarkan SNI 8640:2017 pada fondasi tiang pancang bergantung pada kategori struktur dan risiko seismik. Defleksi lateral yang diizinkan sebesar ≤ 12 mm pada 100% dari beban dan ≤ 25 mm pada 200% dari beban.

4) Analisa Metode Elemen Hingga

Analisis ini bertujuan menyimulasikan fondasi tiang tunggal menggunakan metode elemen hingga dengan perangkat lunak Elemen Hingga 2D.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Interpretasi Data Tanah

Penyelidikan tanah dilakukan pada 5 titik pengujian penyelidikan tanah yang diambil. Data pengujian yang dipakai pada penelitian ini hanya titik uji 1 (BH-1) dan titik uji 3 (BH-3). Dari keseluruhan titik uji yang tersedia, titik BH-1 dan BH-3 dipilih sebagai titik referensi utama untuk analisis lanjutan karena lokasi kedua titik tersebut berada paling dekat dengan posisi tiang TP-3 dan TP-5 untuk BH-1, serta TP-4 untuk BH-3. Hasil perhitungan analisis interpretasi tanah dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Stratifikasi dan rekapitulasi parameter tanah BH-1

Parameter	Simbol	Kedalaman (m)			
		0-4	4-22	22-26	26-30
N-Value	-	6	2	27	50
Konsistensi/Kepadatan	-	<i>Medium to Stiff</i>	<i>Very Soft to Medium</i>	<i>Medium to Loose</i>	<i>Dense to Very Dense</i>
Kohesi (kN/m ²)	c	30,00	10,00	-	-
Sudut Geser (°)	ϕ	-	-	41,50	45,00
Kohesi Efektif (kN/m ²)	c'	3,00	1,00	-	-
Sudut Geser Efektif (°)	ϕ'	21,80	18,60	37,00	38,00
Berat Isi Tanah Normal (kN/m ³)	γ_t	17,00	17,00	17,00	19,00
Berat Isi Tanah Tersaturasi (kN/m ³)	γ_{sat}	17,00	17,00	17,00	19,00
Angka Pori	e_0	1,30	1,60	0,80	0,70
Modulus Elastisitas MPa	E	7,00	2,00	45,50	100,00
Tegangan Vertikal Efektif (kN/m ²)	σ'_v	14,19	93,28	172,37	205,13

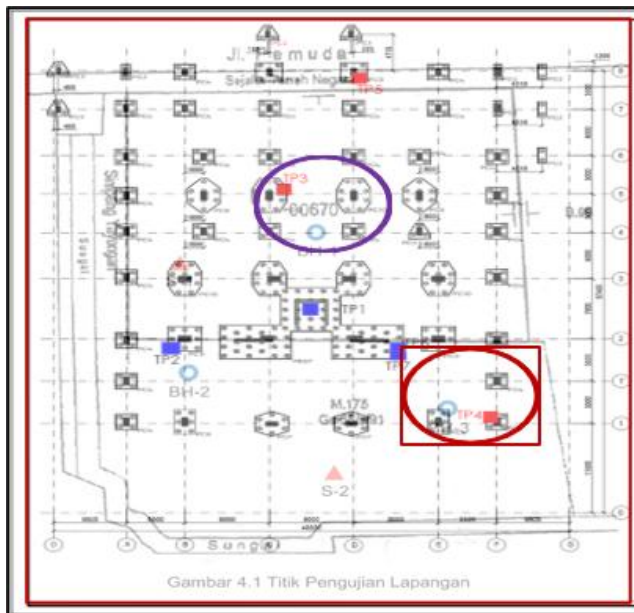
Tabel 3. Stratifikasi dan rekapitulasi parameter tanah BH-3

Parameter	Simbol	Kedalaman (m)			
		0-2	2-24	24-28	28-30
N-Value	-	4	2	50	31
Konsistensi/Kepadatan	-	<i>Soft</i>	<i>Very Soft to Medium</i>	<i>Very Dense</i>	<i>Dense</i>
Kohesi (kN/m ²)	c	20,00	10,00	-	-
Sudut Geser (°)	ϕ	-	-	45,00	40,25
Kohesi Efektif (kN/m ²)	c'	2,00	1,00	-	-
Sudut Geser Efektif (°)	ϕ'	20,20	18,60	45,00	37,00
Berat Isi Tanah Normal (kN/m ³)	γ_t	17,00	17,00	19,00	18,00
Berat Isi Tanah Tersaturasi (kN/m ³)	γ_{sat}	17,00	17,00	19,00	18,00
Angka Pori	e ₀	1,50	1,60	0,80	0,70
Modulus Elastisitas MPa	E	11,60	2,00	100,00	43,00
Tegangan Vertikal Efektif (kN/m ²)	$\sigma'v$	7,00	93,28	190,75	217,32

Berdasarkan data Tabel 2 dan Tabel 3 menunjukkan karakteristik yang bervariasi sesuai kedalaman tiap lapisan. Pada lapisan tanah 1 dan 2 tanah didominasi oleh tanah lempung menunjukkan daya dukung tanah lunak dan mudah terdeformasi serta angka pori yang tinggi mengindikasikan tanah cukup kompresibel.

3.2. Analisis Static Load Test (SLT)

Analisis interpretasi hasil *Static Loading Test* (SLT) dilakukan guna mendapatkan daya dukung tanah. Hasil dari SLT berupa nilai penurunan yang terjadi pada setiap interval pembebanan hingga 200% beban izin rencana. Pengujian SLT dilaksanakan pada 3 (tiga) titik tiang pancang dengan dimensi 400 × 400 mm dengan panjang tiang 27 m, 26 m, dan 25 m. Sebaran titik pengujian SLT dapat dilihat pada Gambar 6. Berdasarkan Gambar 6 terdapat 3 titik tiang dengan hasil uji pembebanan statik dapat dilihat pada Tabel 4.



Gambar 6. Lokasi titik tiang pancang pada pengujian SLT

Tabel 4. Rekapitulasi hasil uji pembebanan aksial statik

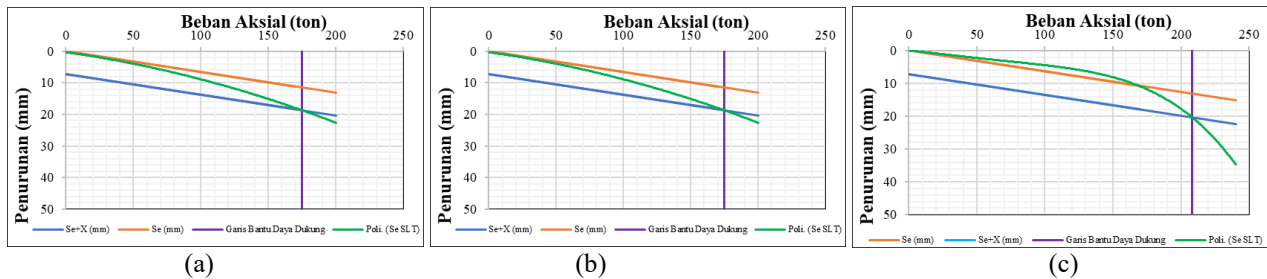
Beban		Penurunan (mm)		
(%)	(ton)	TP-03	TP-04	TP-05
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21,25	21,25	1,75	1,03	1,15
42,50	42,50	3,41	1,71	2,21
63,75	63,75	5,80	2,88	4,00
85,00	85,00	7,71	3,85	4,98
106,25	106,25	9,42	4,88	6,88
127,50	127,50	11,47	6,11	8,57
148,75	148,75	14,09	7,46	10,73
170,00	170,00	18,84	11,20	14,08

1) Metode Davisson (1976)

Metode Davisson merupakan salah satu pendekatan yang umum digunakan dalam interpretasi hasil uji pembebanan aksial statik tiang pancang. Prinsip dasar dari metode ini dengan garis offset yang merepresentasikan batas penurunan elastis tiang. Titik potong tersebut dianggap sebagai batas daya dukung *ultimate* dari tiang pancang yang diuji. Interpretasi dengan metode Davisson dapat dilihat pada Tabel 5 dan Gambar 7.

Tabel 5. Data uji pembebanan aksial statik Metode Davisson TP-03

Beban (ton)	Penurunan (mm)		Metode Davisson	
	(mm)	Regresi (mm)	Se (mm)	Se+X (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	7,14
21,25	1,75	1,70	1,39	8,53
42,50	3,41	3,66	2,79	9,93
63,75	5,80	5,61	4,18	11,32
85,00	7,71	7,57	5,57	12,71
106,25	9,42	9,53	6,96	14,11
127,50	11,47	11,49	8,36	15,50
148,75	14,09	14,09	9,75	16,89
170,00	18,84	18,84	11,14	18,28



Gambar 7. Grafik hubungan beban terhadap penurunan menggunakan Metode Davisson (a) TP-03, (b) TP-04, dan (c) TP-05

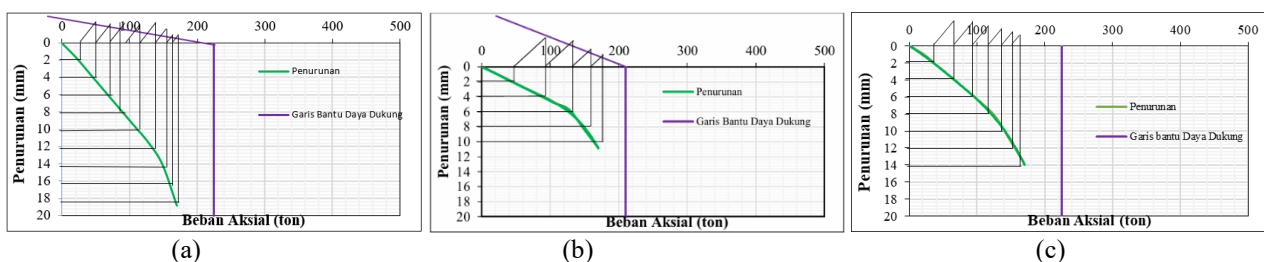
Berdasarkan **Gambar 7** hasil interpretasi menggunakan metode Davisson pada ketiga (3) titik uji tiang menunjukkan bahwa tiang pancang TP-03 memiliki daya dukung akhir sebesar 175 ton, tiang TP-04 sebesar 208 ton, dan tiang TP-05 sebesar 195 ton.

2) Metode Mazurkiewicz

Metode Mazurkiewicz merupakan salah satu pendekatan yang digunakan untuk menentukan daya dukung ultimit (Q_{ult}) tiang pancang berdasarkan hubungan antara beban dan penurunan. Prinsip metode ini didasarkan pada kurva beban-penurunan yang ditarik garis lurus dari bagian akhir kurva (garis tangensial) dan diperpanjang hingga memotong perpanjangan garis linear dari bagian awal kurva. Interpretasi dengan metode Mazurkiewicz dapat dilihat pada **Tabel 6** dan **Gambar 8**.

Tabel 6. Analisis data uji pembebanan aksial statik Metode Mazurkiewicz

Beban (ton)	Penurunan (mm)		
	TP-03	TP-04	TP-05
0,00	0,00	0,00	0,00
21,25	1,70	0,90	1,00
42,50	3,66	1,89	2,42
63,75	5,61	2,87	3,84
85,00	7,57	3,85	5,27
106,25	9,53	4,84	6,69
127,50	11,49	5,71	8,37
148,75	14,09	8,26	11,13
170,00	18,84	10,80	13,88



Gambar 8. Grafik hubungan beban terhadap penurunan menggunakan Metode Mazurkiewicz (a) TP-03, (b) TP-04, dan (c) TP-05

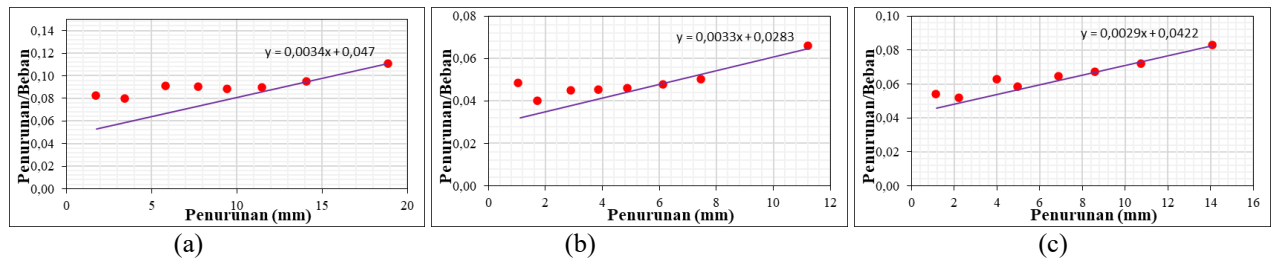
Berdasarkan **Gambar 8** hasil interpretasi menggunakan metode Davisson pada ketiga (3) titik uji tiang yang ditampilkan melalui grafik hubungan beban terhadap penurunan. Berdasarkan grafik-grafik tersebut, diperoleh nilai daya dukung ultimit (Q_{ult}) yaitu TP-03 sebesar 225 ton, TP-04 sebesar 210 ton, dan TP-05 sebesar 225 ton.

3) Metode Chin

Metode Chin merupakan salah satu metode analisis untuk menentukan daya dukung ultimit tiang pancang berdasarkan hubungan antara beban (Q) dan penurunan (S). Metode ini menggunakan pendekatan linear dari nilai S/Q terhadap S . Hasil regresi linear tersebut diperoleh nilai koefisien $C1$ dan $C2$. Interpretasi dengan metode Chin dapat dilihat pada **Tabel 7** dan **Gambar 9**.

Tabel 7. Data uji pembebanan aksial statik Metode Chin TP-03

Beban Q (ton)	Penurunan, S (mm)	Perurunan Regresi, S	Metode Chin (S/Q)	(S/Q) Regresi
0,00	0,00	0,00	0,00	0,0000
21,25	1,75	1,70	0,08	0,0799
42,50	3,41	3,66	0,08	0,0860
63,75	5,80	5,61	0,09	0,0881
85,00	7,71	7,57	0,09	0,0891
106,25	9,42	9,53	0,09	0,0897
127,50	11,47	11,49	0,09	0,0901
148,75	14,09	14,09	0,09	0,0947
170,00	18,84	18,84	0,11	0,1108



Gambar 9. Grafik hubungan beban terhadap penurunan menggunakan Metode Chin (a) TP-03, (b) TP-04, dan (c) TP-05

Berdasarkan Gambar 9 hasil interpretasi menggunakan metode Chin pada ketiga (3) titik uji tiang diperoleh nilai daya dukung ultimit tiang pancang sebesar 170 ton untuk TP-03, 173 ton untuk TP-04, dan 170 ton untuk TP-05.

3.3. Analisis Daya Dukung Tiang menggunakan Metode Analitik

Analisis ini berdasarkan rumus persamaan yang telah dijelaskan padamaka hasil dari perhitungan dapat dilihat pada tabel-tabel di bawah ini. Perhitungan ini dilakukan pada 3 tiang yang berbeda. Berdasarkan rumus mayerhorf, metode α (alpha) dan metode β (betha) didapatkan hasil sebagai berikut pada Tabel 8.

Tabel 8. Rekapitulasi perhitungan daya dukung aksial tekan

Daya Dukung Aksial Tekan				
Kedalaman (m)	Q_s (ton)	Q_p (ton)	Q_u (ton)	Q_{all} (ton)
TP-03;BH-1				
4	16,06	4,41	20,47	8,19
22	45,43	1,47	46,90	18,76
26	112,95	119,29	232,24	92,90
27	131,69	147,27	278,95	111,58
TP-04;BH-3				
2	16,06	2,94	19,00	7,60
24	45,43	1,47	46,90	13,40
26	80,99	147,27	228,26	91,30
TP-05;BH-1				
4	16,06	4,41	20,47	8,19
22	45,43	1,47	46,90	18,76
25	95,01	119,29	214,30	85,72

Analisis selanjutnya setelah mengetahui daya dukung dilakukan perhitungan penurunan menggunakan rumus penurunan elastik. Hasil dari perhitungan dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Rekapitulasi hasil perhitungan penurunan elastik tiang tunggal

Penurunan Seketika				Penurunan Total S _T	
BH-01; TP-03					
Se (1)	Se (2)	Se (3)	Se (m)	mm	Ijin
0,0236	0,0080	0,0001	0,0317	31,72	OK
BH-03; TP-04					
Se (1)	Se (2)	Se (3)	Se (m)	mm	Ijin
0,0175	0,0080	0,0001	0,0256	25,58	OK
BH-01; TP-05					
Se (1)	Se (2)	Se (3)	Se (m)	mm	Ijin
0,0165	0,0080	0,0001	0,0247	24,67	OK

Berdasarkan parameter yang telah diketahui dan jenis material yang digunakan dilakukan perhitungan daya dukung lateral berdasarkan defleksi menggunakan metode broms. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 10 berikut untuk ketiga titik tiang pancang.

Tabel 10. Rekapitulasi perhitungan daya dukung lateral dan defleksi

Titik Uji			BH-01	BH-03	BH-01
ID Tiang			TP-03	TP-04	TP-05
Panjang Efektif (m)			27,00	26,00	25,00
Dimensi (mm)			400,00	400,00	400,00
Kekuatan Tanah dan Tiang	Free-	Qu (kN)	112,00	96,00	112,00
	Head	Qg (kN)	44,80	38,40	44,80
Defleksi		5mm	28,80	20,80	26,67
		10mm	57,60	41,60	53,33
	Free-	12mm	69,12	49,92	64,00
	Head	15mm	86,40	62,40	80,00
		20mm	115,20	83,20	106,67
		25mm	144,00	104,00	133,33

3.4. Analisis Daya Dukung Tiang menggunakan Metode Elemen Hingga (MEH)

Analisis kapasitas daya dukung tiang pancang secara numerik dilakukan menggunakan metode elemen hingga melalui perangkat elemen hingga 2D. Pendekatan ini memungkinkan pemodelan interaksi kompleks antara tiang dan tanah dengan mempertimbangkan berbagai parameter geoteknik.

Tabel 11. Rekapitulasi daya dukung aksial menggunakan metode Elemen Hingga

ID Tiang	Beban 100% (ton)	Daya Dukung Ultimit (ton)				FK
		Davisson	Mazurkiewich	Chin	Q_{ult} (ton)	
TP-03	85	177	214	170	187	2,20
TP-04	85	205	205	171	194	2,40
TP-05	85	200	232	170	201	2,48

Analisis daya dukung aksial dan lateral memiliki perbedaan dalam konfigurasi model. Daya dukung aksial menggunakan pemodelan secara *axisymmetric* untuk 1 tiang, sedangkan untuk daya dukung lateral menggunakan pemodelan dua dimensi bidang (*plane strain*) karena beban

bekerja tegak lurus terhadap sumbu tiang. Hasil perhitungan MEH pada ketiga titik dapat dilihat pada Tabel 11 untuk hasil daya dukung aksial dan Tabel 12 untuk hasil daya dukung lateral.

Tabel 12. Rekapitulasi keluaran daya dukung terhadap defleksi izin

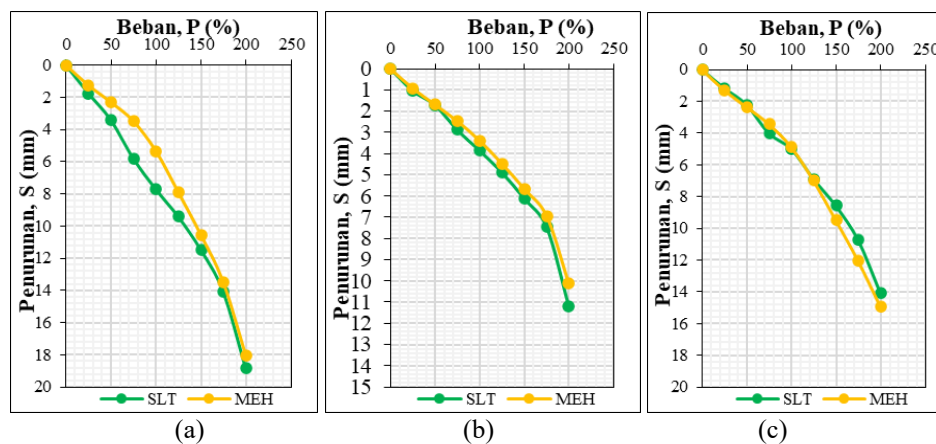
No	Defleksi (mm)	TP-03	TP-04	TP-05
		Qu (kN)		
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	5,00	14,31	14,65	14,11
3	10,00	28,54	28,35	28,18
4	12,00	33,54	33,15	33,08
5	15,00	41,03	40,36	40,44
6	20,00	53,52	51,42	52,69
7	25,00	65,06	60,83	64,11

Tabel 12 menunjukkan daya dukung lateral pada defleksi 12 mm dan 25 mm. Metode Broms (analitik) memberikan nilai 121,35 kN lebih tinggi daripada MEH pada TP-03 dengan defleksi 25 mm. Selisih ini dikarenakan metode Broms

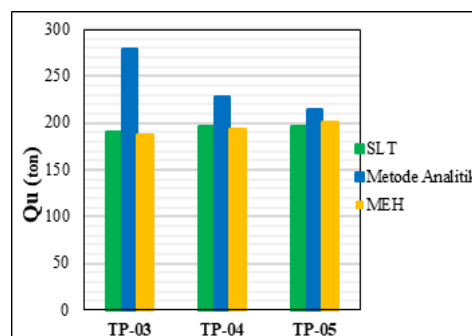
mengasumsikan distribusi tekanan tanah lateral secara simplified (teori Rankine pasif), sedangkan MEH memodelkan interaksi tiang-tanah dengan elemen *interface* yang mempertimbangkan reduksi kekakuan akibat *gap formation* pada sisi tiang. Penelitian serupa pada fondasi tiang tunggal dengan pembebanan statik dan siklik juga melaporkan metode analitik cenderung konservatif (lebih tinggi) dibanding hasil eksperimen atau numerik pada tanah lempung lunak [7]. Berdasarkan data Penyelidikan tanah hanya dilakukan pada dua titik pemboran (BH-1 dan BH-3), terdapat pengaruh sehingga variasi lateral kondisi tanah di lokasi proyek tidak sepenuhnya teridentifikasi.

3.5. Perbandingan Daya Dukung Aksial

Perbandingan ini membahas antara daya dukung aksial ultimit dengan penurunan (settlement) yang terjadi, baik berdasarkan hasil uji lapangan (SLT) maupun hasil pemodelan numerik menggunakan Metode Elemen Hingga (MEH). Perbandingan dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Perbandingan penurunan daya dukung aksial (a) TP-03, (b) TP-04, dan (c) TP-05



Gambar 11. Diagram batang selisih nilai daya dukung aksial ultimit pada tiang

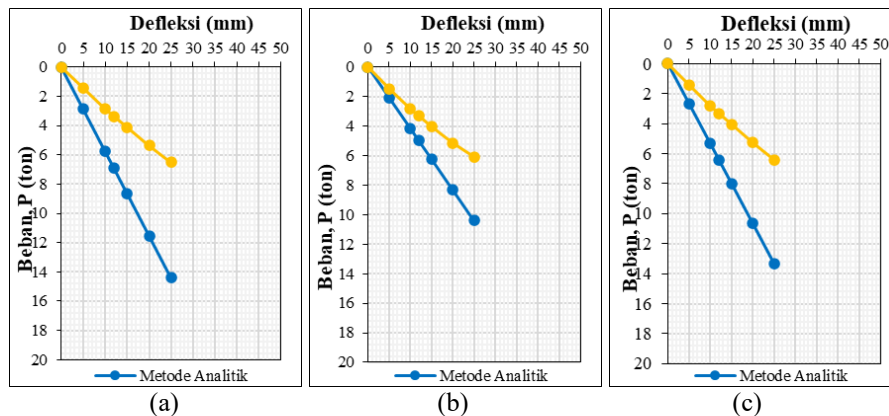
Berdasarkan Gambar 10 perbandingan daya dukung aksial ultimit tiang pancang antara hasil uji SLT dan MEH pada tiga titik pengujian, yaitu TP-03, TP-04, dan TP-05. Pada titik TP-03, hasil uji SLT menunjukkan bahwa metode analitik cenderung memberikan estimasi yang lebih konservatif atau tinggi dibandingkan metode lainnya. Untuk TP-04, nilai SLT menandakan bahwa metode elemen hingga memberikan estimasi yang cukup mendekati hasil uji lapangan. Sementara pada TP-05 selisih nilai titik ini tergolong kecil, menunjukkan konsistensi antara metode numerik dan hasil pengujian lapangan.

Selisih nilai antara ketiga metode di titik ini tergolong kecil, menunjukkan konsistensi antara metode numerik dan hasil pengujian lapangan. Secara umum, metode MEH menunjukkan estimasi daya dukung aksial yang paling mendekati hasil uji lapangan (SLT) dibandingkan dengan metode analitik. Hal ini menunjukkan bahwa metode elemen hingga dapat menjadi pendekatan numerik yang lebih representatif terhadap kondisi lapangan, meskipun tetap perlu dikalibrasi dengan data lapangan untuk meningkatkan akurasi prediksi (Gambar 11).

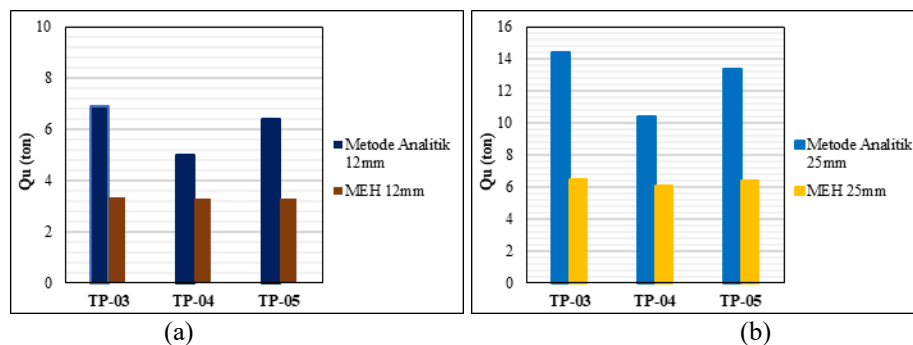
Perbedaan metode analitik (Meyerhof) yang memberikan nilai 46,8% lebih tinggi dari SLT juga sejalan dengan rekomendasi [15], yang menekankan bahwa perhitungan daya dukung aksial dari data insitu (SPT) atau parameter laboratorium sebaiknya dipandang sebagai perkiraan kasar dan perlu verifikasi uji pembebanan jika keamanan diragukan. Pada proyek ini, hasil SLT menjadi konfirmasi bahwa metode Meyerhof cenderung *overestimate* pada tanah lempung lunak dengan nilai N-SPT rendah.

3.6. Perbandingan Daya Dukung Lateral

Analisis dan evaluasi terhadap hubungan antara defleksi yang terjadi pada tiang pancang dan daya dukung lateral ultimit yang dihasilkan. Perbandingan ini penting untuk mengetahui tingkat deformasi tiang terhadap beban lateral serta membandingkan efektivitas dan akurasi antara metode analitik dan MEH. Perbandingan daya dukung lateral hasil metode analitik dan numerik dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Perbandingan Perbandingan Defleksi terhadap Beban (a) TP-03, (b) TP-04, dan (c) TP-05



Gambar 13. Diagram Batang Selisih Nilai Daya Dukung Lateral Ultimit terhadap (a) Defleksi izin 12 mm (b) Defleksi izin 25 mm

Berdasarkan Gambar 13 Pada titik TP-03 menunjukkan bahwa metode analitik memberikan estimasi yang lebih tinggi dibandingkan metode numerik. TP-04, hasil daya dukung lateral dari metode analitik adalah 4,99 ton (12 mm) dan 10,40 ton (25 mm), sedangkan hasil dari metode MEH masing-masing adalah 3,35 ton dan 6,51 ton. Selisih antara kedua metode juga cukup besar, dengan perbedaan maksimum sebesar 70,97 % pada defleksi 25 mm. Pada TP-05, metode analitik menunjukkan daya dukung sebesar 6,40 ton (12 mm) dan 13,33 ton (25 mm), sedangkan metode MEH menghasilkan nilai 3,35 ton dan 6,51 ton. Selisih antara keduanya mencapai 10,61 ton pada defleksi 25 mm.

Dapat disimpulkan bahwa metode analitik cenderung memberikan estimasi daya dukung lateral yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode elemen hingga. Selisih yang cukup signifikan menunjukkan bahwa metode numerik MEH mungkin memberikan pendekatan yang lebih konservatif dalam menganalisis daya dukung lateral, sehingga perlu dikalibrasi atau divalidasi lebih lanjut dengan data lapangan untuk meningkatkan akurasi prediksi. Selain itu, baik pada defleksi 12 mm maupun 25 mm, tren hasil menunjukkan konsistensi antar titik pengujian, di

mana daya dukung lateral meningkat seiring bertambahnya defleksi yang diizinkan.

Metode Broms (analitik) memberikan nilai 121,35 kN lebih tinggi daripada MEH pada TP-03 dengan defleksi 25 mm. Selisih dapat diakibatkan karena metode Broms mengasumsikan distribusi tekanan tanah lateral secara simplified (teori Rankine pasif), sedangkan MEH memodelkan interaksi tiang-tanah dengan elemen interface yang mempertimbangkan reduksi kekakuan akibat gap formation pada sisi tiang. Penelitian serupa pada fondasi tiang tunggal dengan pembebanan statik dan siklik juga melaporkan metode analitik cenderung dibanding hasil eksperimen atau numerik pada tanah lempung lunak.

4. Kesimpulan

Tanah lunak di lokasi studi memerlukan fondasi tiang pancang dengan perhitungan daya dukung dan penurunan yang teliti erta pemilihan metode analisis yang terverifikasi terhadap kondisi lapangan. Hasil analisis uji beban aksial statik berdasarkan metode Davisson, Mazurkiewich dan Chin menunjukkan bahwa tiang pancang TP-03 memiliki daya dukung terendah sebesar 190 ton. Sementara daya dukung aksial tertinggi diperoleh pada TP-

03 sebesar 278,95 ton mengindikasikan adanya overestimasi bila mengandalkan pendekatan analitik tanpa kalibrasi. Maka penurunan maksimum dari simulasi MEH adalah 18,04 mm, masih dalam batas wajar.

Perbandingan terhadap daya dukung aksial pada metode elemen hingga memberikan hasil yang lebih akurat dibanding metode analitik, terutama dalam mendekati hasil uji lapangan. Namun, pada analisis daya dukung lateral terdapat selisih signifikan antara perhitungan analitik dan MEH pada daya dukung lateral. Kerna keterbatasan data dalam studi ini, sehingga diperlukan kehati-hatian dalam interpretasi dan direkomendasikan pembahasan lebih lanjut terkait asumsi model, parameter tanah, dan representasi interaksi tanah–tiang.

Daftar Pustaka

- [1] H. Putra and C. Hidayat “Perbandingan Nilai Daya Dukung Ultimit Tiang Tunggal Berdasarkan Hasil Pengujian Beban Dinamik dan Statik”. *Jurnal Jalan-Jembatan*, vol. 31, no.3, pp. 162–173, 2014.
- [2] E. Mina, R.I. Kusuma and D. Setiawan “Kajian Analisis Pondasi Tiang Pancang untuk Mesin Mixing Drum menggunakan Program (Area Sinter Plant Krakatau Posco)” *Jurnal Fondasi*, vol. 2, no. 2, pp. 159-168, 2013.
- [3] H. C. Hardiyatmo, *Analisis dan Perancangan Fondasi II (5th ed.)*. D.I. Yogyakarta: Gajah Mada University Press, 2023.
- [4] H. C. Hardiyatmo, *Mekanika Tanah 1 (7th ed.)*. D.I. Yogyakarta: Gajah Mada University Press, 2019.
- [5] M. Budhu, *Soil Mechanics and Foundations (3rd ed.)*. U.S of America John Wiley & Sons, 2015
- [6] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 4153:2008 Cara Uji Penetrasi Lapangan dengan SPT*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2008.
- [7] D. Jose and A. Prihatiningsih “Analisis Pengaruh Diameter Tiang terhadap Daya Dukung Lateral Fondasi Tiang Tunggal dengan Pembebanan Statik dan Siklik” *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, vol. 7, no. 2, pp. 503-514, 2024.
- [8] J. Amertunga, N. Sivakugan, and M.D. Braja, *Correlations of Soil and Rock Properties in geotechnical Engineering*. New Delhi: Springer India, 2016.
- [9] M. Tomlinson, and J. Woodward, *Pile Design and Construction Practice (5th ed)*. U.S of America: Taylor & Francis, 2008.
- [10] D. Setiyo, Suhendra, and M. Nuklirullah “Analisa Daya Dukung Tanah untuk Pondasi Tiang Pancang pada Rencana Pembangunan Komplek Pendidikan Islam Al Azhar 57 Jambi”, *Jurnal Civronlit Unbari*, vol. 4, no. 2, pp. 80-92, 2019.
- [11] A. Azizi, M.A. Salim, and G. Ramadhon “Analisis Daya Dukung Dan Penurunan Pondasi Tiang Pancang Proyek Gedung DPRD Kabupaten Pematang” *Jurnal Teknik Sipil: Rancang Bangun*, vol. 06, no. 02, pp. 50-52, 2020.
- [12] I.S. Nugroho and Q. Wiqoyah “Perencanaan Fondasi Tiang Pancang pada Gedung Perkuliahan Universitas Slamet Riyadi (Variasi Diameter Tiang Pancang)” *Jurnal Dinamika Teknik Sipil*, vol. 15, no. 1, pp. 28-36, 2022.
- [13] H.T. Santoso and J. Hartono “Analisis Perbandingan Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang berdasarkan Hasil Uji SPT dan Pengujian Dinamis” *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, vol. 4, no. 1, pp. 31-38, 2002.
- [14] E. Yulawan and T. Rahayu “Analisis Daya Dukung dan Pengujian Pondasi Tiang berdasarkan Pengujian SPT dan *Cyclic Load Test*” *Jurnal Konstruksia*, vol. 9, no. 2, pp. 1-13, 2018.
- [15] L.G. Ahmad and M. Surahman “Analisis Daya Dukung Tiang Pancang menggunakan Data *In situ Test*, Parameter Laboratorium terhadap *Loading Test Kantedge*” *Jurnal Konstruksia*, vol. 7, no. 2, pp. 65-72, 2016.
- [16] V. N. Murthy, *Principles and Practices Soil Mechanics and Foundation Engineering*. New York: Madison Avenue, 2019
- [17] B. Look, *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. London, UK: Taylor & Francis Group, 2001