

Studi Komparatif Tahanan Gesek antara Tiang Terpancang dan Tiang Tertimbun pada Tanah Pasir Pantai

I Made Dirgayusa¹, Sito Ismanti^{1,*}, Ahmad Rifa'i¹

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta¹

Koresponden*, Email: sito.ismanti@ugm.ac.id

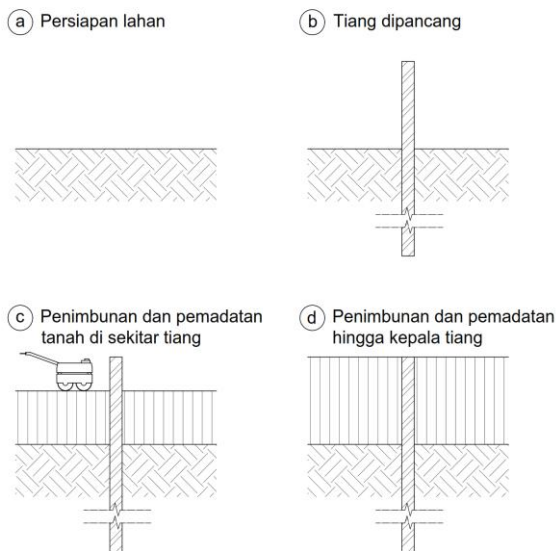
Info Artikel		Abstract
Diajukan	01 September 2024	<i>The position of foundation pile caps of monument constructed on coastline changed from below to above the soil surface. Therefore, the piles were driven in a free-standing condition and then covered with beach sand soil. This research aims to analyze the frictional resistance of buried pile, then compare it with the frictional resistance of ordinary piles. Practical analysis methods and finite element methods using RS Pile software are compared to obtain a representative method. The comparison results show that the Meyerhof method has the closest soil bearing capacity behavior to the field test results. Based on the results, the skin friction of buried piles is 52% - 57% lower than ordinary piles. This decrease occurred because the assumed value of the angle of friction in the soil was lower because the soil around the pile was not as dense as in ordinary conditions which compacted during the driving process.</i>
Diperbaiki	16 Januari 2025	
Disetujui	11 Agustus 2025	
<i>Keywords: buried pile frictional resistance, driven pile, beach sand soil, bearing capacity</i>		Abstrak Fondasi monumen di pantai mengalami perubahan posisi pile cap dari permukaan tanah asli menjadi selevel timbunan dengan tinggi 3,1 m, sehingga tiang yang dipancang dalam kondisi free standing harus ditimbun pasir. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi khusus tahanan gesek yang terjadi antara selimut tiang dengan tanah timbunan, dibandingkan dengan tahanan gesek tiang yang dipancang normal. Analisis perbandingan akan representatif jika menggunakan pilihan metode yang memberikan informasi perilaku tiang yang mendekati kondisi riil berdasarkan hasil pengujian lapangan. Pilihan metode yang dibandingkan adalah metode analitik yang umum digunakan dan metode elemen hingga dengan software RS Pile. Hasil perbandingan menunjukkan metode Meyerhof menghasilkan perilaku kapasitas dukung yang paling mendekati hasil lapangan. Berdasarkan hasil analisis, tahanan gesek tiang yang ditimbun 52% - 57% lebih rendah dari tiang yang dipancang normal. Nilai tahanan gesek yang lebih rendah terjadi akibat tanah di sekitar tiang tidak sepadat kondisi normal yang memadat saat proses pemancangan sehingga tanah memiliki nilai sudut gesek internal tanah lebih rendah.
<i>Kata kunci: tahanan gesek tiang tertimbun, tiang pancang, pasir pantai, kapasitas dukung tanah</i>		

1. Pendahuluan

Fondasi adalah salah satu bagian paling penting dari bangunan yang menyalurkan beban dari struktur atas ke tanah. Kapasitas dukung tanah adalah kemampuan tanah untuk menahan gaya yang bekerja pada tanah tanpa mengalami kegagalan. Fondasi yang aman memiliki kapasitas dukung ijin yang lebih besar dibandingkan beban yang bekerja, di mana kapasitas dukung ijin diperoleh dari membagi kapasitas dukung ultimit dengan faktor aman. Nilai faktor aman minimum fondasi dalam yang digunakan sebesar 2,5 [1]. Terdapat banyak metode yang digunakan dalam menghitung kapasitas dukung tanah, di mana tiap peneliti atau praktisi memiliki kecocokan dengan suatu metode karena dirasa mampu memperkirakan kapasitas dukung tanah dengan baik. Salah satu metode yang sering digunakan adalah metode elemen hingga di mana metode ini mampu menghitung daya dukung tanah dengan baik yang dibuktikan dengan hasil analisis yang mendekati hasil uji Pile Driving

Analyzer Test (PDA Test) [2] [3]. Beberapa peneliti menggunakan metode Meyerhof sebagai metode pembandingan dengan hasil pengujian laboratorium dan lapangan [4] [5]. Metode selanjutnya adalah metode U.S. Army yang digunakan untuk memperkirakan kapasitas dukung aksial dari tiang pancang pada tanah pasir [6] [7]. Metode Poulos dan Davis untuk perhitungan kapasitas dukung fondasi rakit dengan tiang pancang juga cukup sering digunakan untuk penelitian dengan hasil yang baik [8].

Perubahan kondisi di lapangan sering mengakibatkan perubahan desain struktur. *Pile cap* dari suatu monumen mengalami perubahan posisi dari di bawah timbunan menjadi di atas timbunan. Akibat dari perubahan ini adalah adanya tiang yang berdiri dengan kepala tiang di elevasi atas timbunan (*free standing*). Tiang tersebut kemudian di timbun dengan pasir dan dipadatkan. Tahapan pelaksanaan dari tiang yang ditimbun disajikan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Tahapan pelaksanaan.

- Persiapan lahan di lapangan.
- Pemancangan tiang hingga posisi *free standing*.
- Penimbunan dan pemadatan timbunan pasir.
- Proses penimbunan dan pemadatan diulangi hingga didapat elevasi rencana.

Tiang yang ditimbun memiliki perilaku yang berbeda dengan tiang yang dipancang sehingga memiliki persamaan tahanan gesek yang berbeda juga. Nagai mengusulkan persamaan untuk menghitung tahanan gesek dari tiang pancang yang dipasang di sebelah kolom timbunan pasir [9]. Persamaan yang diusulkan Nagai berasal dari pengujian laboratorium dan belum diuji dengan hasil di lapangan. Studi ini akan menggunakan persamaan yang diusulkan oleh Nagai untuk menghitung tahanan gesek tiang yang ditimbun dengan melakukan penyesuaian parameter *ratio of fracture area* sesuai dengan kondisi eksisting. Desain tiang pancang yang diubah menjadi tiang yang ditimbun dapat mengurangi kapasitas dukung tanah dan meningkatkan defleksi yang terjadi pada kepala tiang yang dapat mengakibatkan fondasi menjadi tidak aman [10]. Hasil dari perbandingan dapat membantu memahami besar reduksi tahanan gesek yang terjadi pada tiang yang ditimbun.

Studi perbandingan kapasitas dukung tanah hasil pengujian PDA test dengan metode analitis lainnya sudah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Studi ini akan menggunakan metode analisis yang umumnya digunakan seperti Meyerhof, Poulos dan Davis, U.S Army dan metode elemen hingga. Hasil dari analisis metode – metode tersebut dibandingkan dengan hasil PDA test untuk memperoleh metode yang hasilnya paling mendekati hasil PDA test yang kemudian akan dibandingkan dengan hasil analisis tiang yang ditimbun menggunakan metode Nagai [9].

2. Metode

2.1. Kapasitas Dukung Tanah

Kapasitas dukung aksial tanah (Q_u) dari tiang terdiri dari dua komponen utama yaitu, tahanan ujung tiang (Q_b) dan tahanan gesek (Q_s). Nilai Q_u , Q_b dan Q_s dihitung dengan Persamaan (1), (2), dan (3). Tahanan ujung dan tahanan gesek tiang pada tanah pasir dapat dihitung menggunakan metode Meyerhof, Poulos dan Davis dan U.S Army.

$$Q_u = Q_b + Q_s - W_p + U \quad (1)$$

$$Q_b = A_b f_b \quad (2)$$

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

dengan f_b adalah tahanan ujung tiang persatuan luas, f_s tahanan gesek tiang persatuan luas, A_b luas ujung tiang dan A_s luas selimut tiang.

2.1.1. Metode Meyerhof

Meyerhof mengusulkan perhitungan kapasitas dukung tiang pada tanah berpasir dengan menggunakan pendekatan nilai N SPT. Nilai N SPT yang digunakan adalah N SPT yang terkoreksi alat dan *overburden*. Nilai f_b dan f_s metode ini dihitung dengan Persamaan (4) dan Persamaan (5).

$$f_b = 0,4 N_{60}' \sigma_r (L/d) \quad (4)$$

$$f_s = \frac{1}{50} \sigma_r N_{60} \quad (5)$$

dengan N_{60} adalah N SPT terkoreksi alat, N_{60}' adalah nilai N_{60} terkoreksi *overburden*, σ_r adalah tegangan referensi dengan nilai 100 kN/m², L adalah panjang dari tiang [11].

2.1.2. Metode Poulos dan Davis

Poulos dan Davis menyarankan nilai *overburden* tanah konstan setelah kedalaman kritis (z_c). Persamaan yang diusulkan oleh Poulos dan Davis untuk menghitung kapasitas dukung tiang disajikan pada Persamaan (6) dan Persamaan (7).

$$f_b = p_b' N_q \quad (6)$$

$$f_s = K_d p_o' \tan \alpha \tan \delta \quad (7)$$

di mana p_b' adalah tekanan *overburden* di ujung tiang, N_q adalah faktor kapasitas dukung, K_d adalah koefisien tekanan lateral tanah pada selimut tiang dan δ adalah sudut gesek internal tanah pada selimut tiang [12].

2.1.3. Metode U.S. Army

Metode U.S. Army memiliki persamaan yang sama dengan persamaan yang diusulkan Poulos dan Davis pada Persamaan (6) dan Persamaan (7). Nilai z_c pada metode ini ditentukan dari kepadatan pasir dan diameter tiang (d). Persamaan nilai z_c berdasarkan kepadatannya dihitung dengan Persamaan (8), (9), dan (10).

Nilai z_c pada pasir lepas

$$z_c = 10d \quad (8)$$

Nilai z_c pada pasir sedang:

$$z_c = 15d \quad (9)$$

Nilai z_c pada pasir padat:

$$z_c = 20d \quad (10)$$

Nilai K_d dan d diusulkan metode U.S. Army disajikan pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.

Tabel 1. Nilai d (U.S. Army)

Material Tiang	d
Tiang baja	$0,67\phi' - 0,83\phi'$
Tiang beton	$0,90\phi' - 1,00\phi'$
Tiang kayu	$0,80\phi' - 1,00\phi'$

Tabel 2. Nilai K_d (U.S. Army)

Jenis Tanah	K_d
Pasir	1,00 – 2,00
Lanau	1,00
Lempung	1,00

2.2. Tahanan Gesek Tiang Ditimbun Pasir

Nagai mengusulkan persamaan untuk menghitung tahanan gesek dan sudut gesek internal tanah pada tiang pancang di samping kolom timbunan pasir [9]. Persamaan yang diusulkan Nagai disajikan pada Persamaan (11), (12), (13) dan (14).

$$f_s = \frac{\bar{\sigma}_h \tan(\phi') (d + 2\bar{\alpha}) \eta}{d} \quad (11)$$

$$\phi' = 0.9\phi \quad (12)$$

$$\sigma_h = \sigma_v K'_0 \quad (13)$$

$$K'_0 = 1 - \sin \phi' \quad (14)$$

dengan, σ_h adalah tekanan tanah lateral, $\bar{\alpha}$ adalah *shear band*, h adalah *rasio fracture area*, σ_v adalah tekanan tanah vertikal dan K'_0 adalah tekanan tanah saat diam.

2.2.1. Shear Band ($\bar{\alpha}$)

Shear band adalah area yang terbentuk saat suatu material mengalami deformasi di mana regangan geser terjadi secara intensif pada material yang berperilaku plastis. Peneliti terdahulu telah melakukan pengujian nilai *shear band* dari material tanah pasir dan mengusulkan persamaan – persamaan pendekatan [13] [14] [15] [16] [17]. Rekomendasi persamaan empirik untuk menghitung nilai *shear band* pasir disajikan pada Persamaan (15), (16), (17), (18) dan (19).

Nagai dan Nakamura:

$$3,8 D_{50} \text{ hingga } 6,3 D_{50} \quad (15)$$

Rattez dkk.:

$$10 D_{50} \text{ hingga } 17 D_{50} \quad (16)$$

Nitka dan Grabowski:

$$18 D_{50} \text{ hingga } 20 D_{50} \quad (17)$$

Gu dkk.:

$$11.2 D_{50} \text{ hingga } 22.3 D_{50} \quad (18)$$

Kawamoto dkk.:

$$10 D_{50} \quad (19)$$

Persamaan – persamaan tersebut akan digunakan untuk mengetahui rentan nilai tahanan gesek pada tiang yang ditimbun.

2.2.2. Ratio of Fracture Area (η)

Ratio of fracture area adalah perbandingan dari area kegagalan geser dari tanah timbunan dan total area kegagalan geser. Nagai dan Nakamura mengusulkan Persamaan (20), (21), (22), dan (23) untuk menghitung *ratio of fracture area* tanah timbunan [13]. Posisi timbunan pada penelitian yang dilakukan Nagai dan Nakamura berada di sebelah kolom pasir di mana di sekitar tiang dan kolom pasir adalah tanah eksisting seperti pada **Gambar 2**.

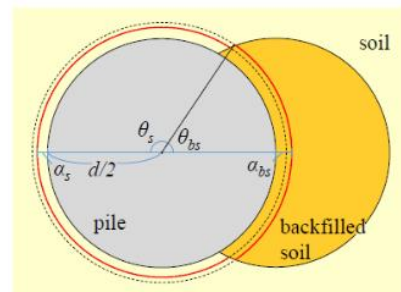
$$\eta = \frac{(d + 2\alpha_{bs})\theta_{bs}}{(d + 2\alpha_s)\theta_s + (d + 2\alpha_{bs})\theta_{bs}} \quad (20)$$

$$\theta_s = \pi - \theta_{bs} \quad (21)$$

$$\theta_{bs} = \left(\frac{d + 2\bar{\alpha}}{2d} \right) \quad (22)$$

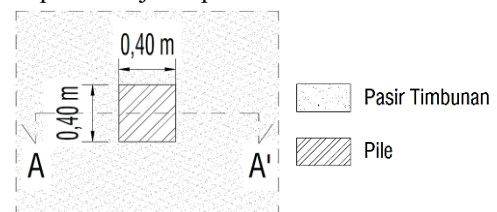
$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_s + \alpha_{bs}}{2} \quad (23)$$

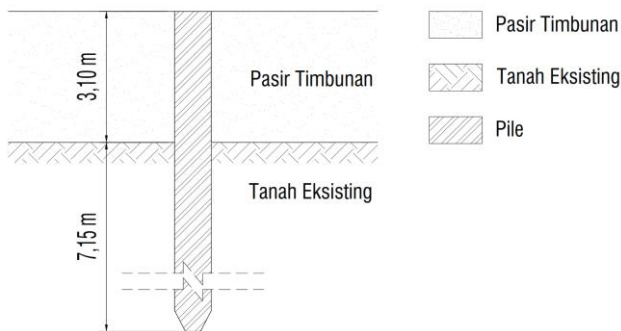
dengan, α_s adalah *shear band* dari tanah eksisting, α_{bs} adalah *shear band* dari tanah timbunan, θ_s adalah sudut dari tanah eksisting dengan pusat tiang dan θ_{bs} adalah sudut dari tanah timbunan dengan pusat tiang.



Gambar 2. Bentuk asumsi dari area kegagalan geser pada tiang di sebelah timbunan [13].

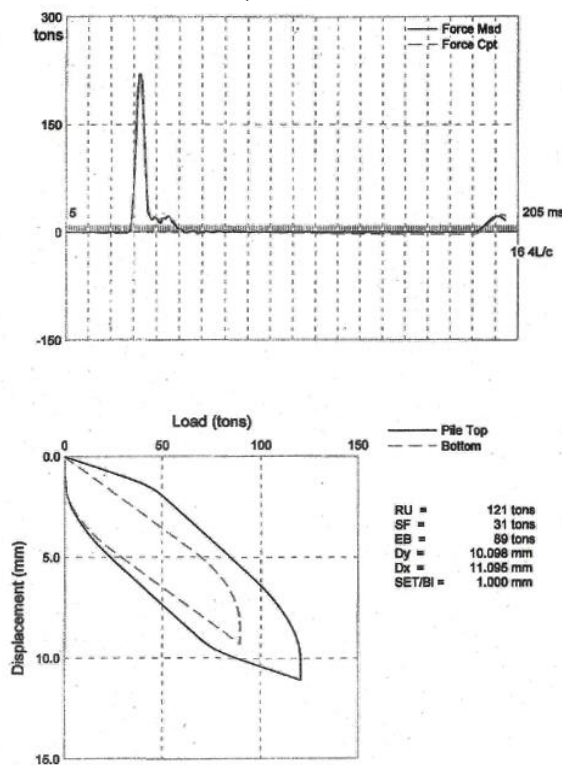
Posisi tiang pada penelitian ini seluruhnya berada di tanah timbunan berbeda dengan **Gambar 2** di mana timbunan tidak berada di seluruh permukaan tiang seperti pada **Gambar 3**. Nilai dari parameter – parameter *Ratio of fracture area* pada Persamaan (20), (21), (22), dan (23) perlu disesuaikan dengan kondisi eksisting. Kondisi eksisting tiang yang tertimbun pasir disajikan pada **Gambar 3** dan **Gambar 4**.



Gambar 3. Tiang pada kondisi eksisting.**Gambar 4.** Potongan A – A' dari tiang yang tertimbun.

2.3. Pile Driving Analyzer (PDA) Test

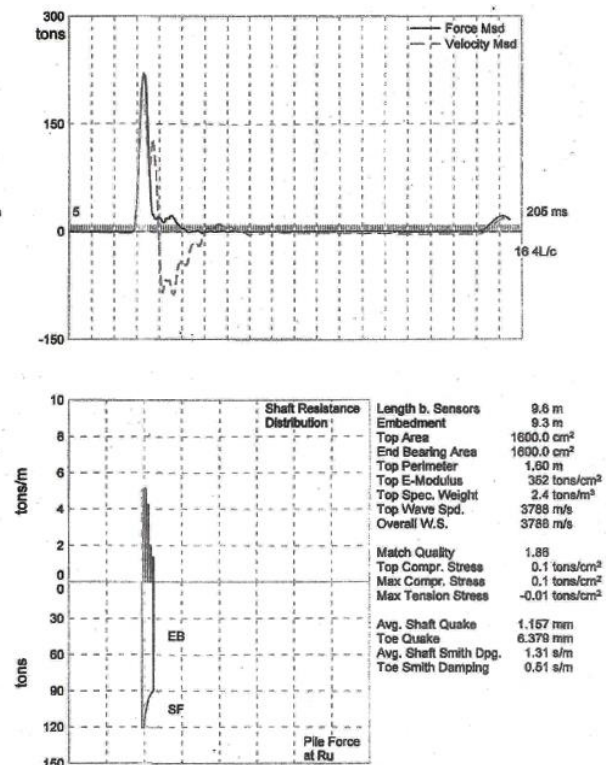
Data uji PDA yang digunakan disajikan pada **Gambar 5**, data tersebut telah dioleh menggunakan *Case Wave Analyze Program* (CAPWAP) untuk memperoleh kapasitas dukung aksial ultimit (Q_u), tahanan ujung tiang (Q_b), tahanan gesek tiang (Q_s), penurunan elastis (D_y) dan penurunan maksimum



(D_x). Data uji PDA yang baik diperlukan untuk menjadi pembandingan hasil analisis metode analitik. Kriteria hasil PDA test yang baik disajikan sebagai berikut [18]:

- memiliki nilai gaya dan kecepatan pada grafik yang proporsional saat puncak pertama dari kedua parameter,
- gaya dan kecepatan pada grafik bernilai 0 sebelum tumbukan,
- gaya dan kecepatan bernilai relatif stabil di 0 saat akhir pengujian,
- perbedaan pembacaan gaya dari dua sensor tegangan tidak melebihi 1/3 sampai 1/2 dari gaya maksimum,
- hasil interpretasi dari tes dinamik harus dibuat menggunakan *signal matching analysis* seperti CAPWAP.

Hasil uji PDA pada **Gambar 5** sudah baik dan dapat digunakan sebagai acuan karena memenuhi kriteria yang telah dijelaskan.

**Gambar 5.** Hasil PDA test.

2.4. Properti Tiang dan Tanah

Tiang yang digunakan adalah tiang pracetak dengan bentuk persegi dengan sisi 0,4 m dan mutu beton sebesar f'_c 41,5 MPa. Panjang dari tiang sebesar 11 m dengan 3,1 m tiang tertimbun pasir dan 7,15 m pada tanah eksisting seperti pada **Gambar 4**. Data tanah yang digunakan pada penelitian ini berasal dari pengujian lapangan dan tes laboratorium.

Lokasi dari pengujian berada di Pantai Provinsi Bali. Hasil dari pengujian tanah eksisting dan timbunan disajikan sebagai berikut ini.

2.4.1. Data Tanah Eksisting

Sampel tanah eksisting diambil saat pengujian SPT pada kedalaman 1,5 m dan 6,5 m. Muka air tanah pada saat

pengujian PDA berada pada elevasi 0 m. Rangkuman hasil uji tanah eksisting yang telah dilakukan disajikan pada **Tabel 3** dan **Tabel 4**.

Tabel 3. Hasil uji SPT tanah eksisting

Kedalaman (m)	N	N_{60}
2	35	26
4	34	26
6	18	15
8	18	17
10	20	19

Tabel 4. Hasil uji laboratorium tanah eksisting

Kedalaman	Jenis Tanah	Parameter	Nilai
0 m – 4 m	<i>Dense sand</i>	w	11,16%
		γ_b	16,43 kN/m ³
		G_s	2,525
		ϕ	34,60°
4 m – 10 m	<i>Medium sand</i>	w	9,25%
		γ_b	1,598 kN/m ³
		G_s	2,502
		ϕ	29,60°

2.4.2. Data Tanah Timbunan

Tanah timbunan yang digunakan adalah tanah pasir yang berasal dari sekitar area pembangunan. Uji *sand cone* dan pendekatan empirik dilakukan untuk memperoleh parameter tanah timbunan. Hasil pengujian *sand cone* dan pendekatan empirik yang telah dilakukan, disajikan pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Hasil uji laboratorium tanah timbunan

Parameter	Nilai
N_{60}	10
G_s	2,525
w	10,31%
ϕ	32,128°
γ_b	15,497 kN/m ³
γ_{sat}	18,277 kN/m ³
D_{50}	0,0004 m

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil PDA Test

Hasil uji PDA pada **Gambar 4** dianalisis dengan CAPWAP dan disajikan pada **Tabel 6**. Mekanisme kerja dari fondasi tiang adalah kepala tiang menerima beban dari struktur di atasnya kemudian beban akan ditahan oleh tahanan gesek tiang hingga seluruh tahanan gesek bekerja lalu sisa beban akan ditahan oleh tahanan ujung tiang. Hasil pengujian PDA dan analisis CAPWAP menunjukkan tahanan ujung tiang yang bekerja lebih besar dibandingkan tahanan gesek tiang. Kondisi ini menunjukkan tahanan gesek yang bekerja sudah maksimal dan tahanan ujung sudah bekerja

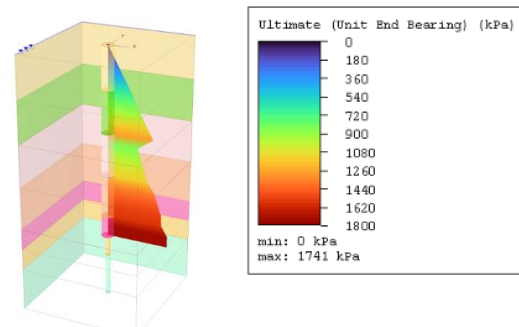
sehingga hasil pengujian PDA ini sudah cukup mewakili kapasitas dukung tanah di lapangan.

3.2. Hasil Analisis Metode Analitik

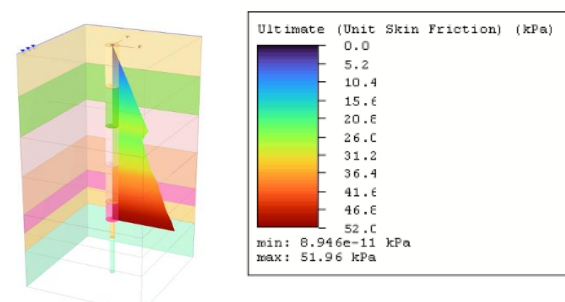
Penelitian ini menggunakan tiga metode perhitungan analitik yaitu, metode Meyerhof, Poulos dan Davis dan U.S Army. Ketiga metode tersebut digunakan untuk menghitung nilai Q_b , Q_s dan Q_u dari tiang pancang. Hasil analisis dari ketiga metode analitik yang digunakan disajikan pada **Tabel 6**.

3.3. Hasil Analisis Metode Elemen Hingga

Parameter dari tiap lapisan tanah dan tiang dimodelkan dengan *software* RS Pile. Pemodelan tiang dari analisis kapasitas dukung tanah menggunakan RS Pile terbatas pada bentuk tiang bundar, sehingga hasil analisis yang digunakan berupa nilai tahanan ujung tiang per satuan luas (f_b) dan tahanan gesek/selimum per satuan luas (f_s). Nilai dari f_b dan f_s akan dikalikan dengan luasan masing - masing jenis tahanan untuk memperoleh kapasitas dukung tiang. Hasil analisis dan pemodelan dari metode elemen hingga menggunakan RS Pile disajikan pada **Tabel 6**, **Gambar 5**, dan **Gambar 6**.



Gambar 6. Nilai f_b hasil analisis RS Pile.



Gambar 7. Nilai f_s hasil analisis RS Pile.

3.4. Perbandingan Kapasitas Dukung Tanah

Hasil analisis metode analitik dan metode elemen hingga akan dibandingkan dengan hasil pengujian PDA untuk memperoleh metode yang paling mendekati hasil pengujian

PDA. Hasil perbandingan kapasitas dukung tanah disajikan pada **Tabel 7**.

Hasil perbandingan pada **Tabel 7** menunjukkan metode U.S. Army dan metode elemen hingga memiliki kapasitas dukung ultimit yang mendekati hasil pengujian PDA, namun perilaku tiang dari kedua metode ini berbeda dengan hasil uji PDA. Perilaku tiang dari uji PDA menunjukkan tahanan gesek tiang telah bekerja maksimal sehingga kapasitas ujung tiang bekerja. Perilaku tiang yang paling mendekati hasil uji PDA ada pada metode Meyerhof, selain itu nilai tahanan ujung dan tahanan gesek metode ini cukup mendekati hasil uji PDA dibandingkan metode lainnya. Hasil – hasil tersebut menjadi dasar pemilihan metode Meyerhof sebagai metode yang akan digunakan sebagai pembanding analisis tahanan gesek pada tiang yang ditimbun pasir.

3.5. Tahanan Gesek Tiang yang Ditimbun

Fondasi tiang yang dipasang dengan ditimbun memiliki perilaku tahanan gesek yang berbeda dengan fondasi tiang umumnya di mana tiang dipancang masuk ke dalam tanah. Kondisi ini menyebabkan asumsi yang digunakan pada persamaan analitik yang sering digunakan untuk menghitung tahanan gesek tidak terpenuhi. Tahanan gesek tiang persatuan luas pada tiang yang ditimbun dapat dihitung dengan persamaan yang diusulkan oleh Nagai di mana kondisi tiang yang dianalisis cukup mirip dengan kondisi eksisting. Persamaan – persamaan yang digunakan untuk menghitung tahanan gesek tiang tertimbun adalah Persamaan (11) dan Persamaan (12). Persamaan *shear band* yang diusulkan peneliti sebelumnya pada Persamaan (15), (16), (17), (18) dan (19) digunakan untuk mengetahui besar rentang nilai tahanan gesek yang dihasilkan. Hasil perhitungan menunjukkan tahanan gesek tiang tertimbun dari kondisi eksisting disajikan pada **Tabel 8**. Hasil analisis menunjukkan nilai tahanan gesek persatuan luas dari tiang yang ditimbun sebesar 12,73 kN/m² hingga 13,20 kN/m².

Perbandingan tahanan gesek tiang yang ditimbun dan tiang pancang dilakukan dengan membandingkan hasil analisis yang telah dilakukan dari metode perhitungan yang diusulkan Nagai dan metode pembanding yaitu metode Meyerhof. Hasil analisis tahanan gesek tiang metode Meyerhof menghasilkan tahanan gesek sebesar 20,00 kN/m² sedangkan metode Nagai menghasilkan nilai dengan rentang 12,73 kN/m² hingga 13,20 kN/m². Perbandingan hasil kedua metode ini menunjukkan bahwa tahanan gesek tiang yang ditimbun memiliki nilai yang lebih rendah dari tiang yang dipancang sebesar 52% - 57%.

Tabel 6. Kapasitas dukung tiap metode

Metode	Q_b (ton)	Q_s (ton)	Q_u (ton)
PDA test (CAPWAP)	89	31	121

Meyerhof	131,8	59,6	189,5
Poulos dan Davis	24,1	36,0	58,2
U.S. Army	39,4	56,6	94,0
RS Pile	27,8	74,8	100,7

Tabel 7. Perbandingan kapasitas dukung tiap metode dengan hasil uji PDA

Metode	ΔQ_b	ΔQ_s	ΔQ_u
Meyerhof	48%	92%	57%
Poulos dan Davis	73%	16%	52%
U.S. Army	56%	83%	22%
RS Pile	69%	141%	17%

Tabel 8. Tahanan gesek tiang yang ditimbun

Shear Band	f_s (kN/m ²)	
	minimum	maksimum
3,8 D_{50} hingga 6,3 D_{50}	12,73	12,79
10 D_{50} hingga 17 D_{50}	12,88	13,06
18 D_{50} hingga 20 D_{50}	13,09	13,14
11,2 D_{50} hingga 22,3 D_{50}	12,92	13,20
10 D_{50}	12,88	

3.6. Diskusi

Tabel 7 menunjukkan metode U.S. Army memiliki hasil kapasitas dukung ultimit yang paling mendekati hasil pengujian PDA dibandingkan metode analitik lainnya, namun metode ini belum dapat memperkirakan perilaku tiang di mana metode ini dan metode Poulos dan Davis menghasilkan nilai tahanan ujung yang jauh lebih kecil dibandingkan hasil uji PDA. Hasil ini disebabkan oleh nilai z_c yang kurang akurat dalam memperkirakan kedalaman di mana nilai *overburden* tanah mulai konstan. Metode Poulos dan Davi memiliki nilai z_c yang dangkal sehingga nilai *overburden* yang konstan akan kecil dibandingkan metode lainnya. Pernyataan ini diperkuat dengan hasil analisis metode Poulos dan Davis yang paling kecil dibandingkan dengan metode lain dan pengujian lapangan. Metode Meyerhof tidak memiliki batasan nilai *overburden* sehingga semakin dalam elevasi tanah akan menyebabkan nilai *overburden* semakin besar, Ujung tiang memiliki elevasi yang paling dalam dari sebuah tiang sehingga nilai *overburden* pada titik ini yang paling besar dibandingkan elevasi lainnya pada tiang yang menyebabkan nilai tahanan ujung tiang metode Meyerhof yang lebih besar dibandingkan dengan hasil metode lainnya. Hasil tahanan ujung metode Meyerhof memiliki nilai yang paling mendekati hasil uji PDA dibandingkan dengan metode lainnya serta dapat memperkirakan perilaku tiang di mana tahanan ujung dan tahanan gesek tiang telah bekerja maksimal. Hasil tahanan gesek dari metode Meyerhof sudah cukup baik dalam memperkirakan tahanan gesek di lapangan bila dibandingkan

dengan metode – metode lainnya. Metode Meyerhof yang konsisten menghasilkan nilai tahanan ujung maupun tahanan gesek yang lebih besar dari hasil uji PDA menunjukkan metode ini memerlukan pembatasan nilai untuk dapat lebih baik dalam memperkirakan kapasitas dukung tanah di lapangan.

Tahanan gesek dari metode Nagai menunjukkan hasil yang lebih rendah dibandingkan dengan hasil metode Meyerhof sebesar 52% - 57%. Reduksi yang terjadi dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti kepadatan pasir dan nilai sudut gesek internal tanah. Kepadatan dari pasir timbunan yang lebih rendah dibandingkan dengan pasir pada kondisi eksisting. Faktor lainnya adalah adanya asumsi reduksi nilai sudut gesek internal pada metode Nagai sebesar 0,9. Proses tiang yang dipancang masuk ke dalam tanah akan mengakibatkan tanah di sekitar tiang menjadi lebih padat di mana hal ini akan menyebabkan peningkatan parameter kekuatan tanah yaitu sudut gesek internal tanah. Hasil dari perbandingan ini mengindikasikan perlu adanya kehati-hatian dalam mendesain fondasi tiang yang ditimbun dengan pasir karena pada kondisi ini akan menghasilkan tahanan gesek tiang yang lebih rendah dibandingkan dengan fondasi tiang pancang. Reduksi ini dapat mengakibatkan peningkatan jumlah atau dimensi tiang yang dibutuhkan untuk mendesain fondasi tiang yang ditimbun bila dibandingkan dengan fondasi tiang pancang.

4. Simpulan

Hasil analisis dan perbandingan yang telah dilakukan menunjukkan nilai kapasitas dukung tanah hasil metode Meyerhof memiliki nilai yang paling mendekati hasil pengujian lapangan hasil pengujian PDA. Metode Meyerhof mampu memperkirakan perilaku tiang di mana tahanan ujung tiang telah bekerja maksimal serta memiliki nilai tahanan ujung yang paling mendekati hasil uji PDA dan tahanan gesek yang cukup dekat dengan hasil uji PDA, sehingga metode ini digunakan sebagai metode pembanding. Tahanan gesek tiang metode Nagai memiliki nilai yang lebih rendah dari metode Meyerhof sebesar 52% - 57%. Reduksi yang terjadi pada tiang yang ditimbun dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti kepadatan tanah di sekitar tiang yang lebih rendah dan sudut gesek internal tanah yang direduksi pada metode Nagai.

Daftar Pustaka

- [1] SNI 8460:2017, *Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2017.
- [2] H. Maizir, R. Suryanita, and H. Jingga, "Estimation of Pile Bearing Capacity of Single Driven Pile in Sandy Soil using Finite Element and Artificial Neural Network Methods," in *International Conference on Engineering & Technology, Computer, Basic & Applied Sciences ECBA*, 2016, pp. 2–12. doi: 10.13140/RG.2.1.4009.7520.
- [3] M. A. Prayogo, H. Wahyudi, and I. B. Mochtar, "Comparison Between the Results of the Pile Bearing Capacity Analysis Based on Empirical Method and Finite Element Method Using the Results of Dynamic Analysis on the Field," *J. Civ. Eng.*, vol. 36, no. 1, p. 10, 2021, doi: 10.12962/j20861206.v36i1.8777.
- [4] W. K. Leong, N. A. Yusoff, A. N. A. Aziz, and Z. A. Talib, "Theoretical and Actual Bearing Capacity of Driven Piles Using Model Piles in Sand," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 773, pp. 1453–1459, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.773-774.1453.
- [5] A. A. Rahman, F. Hariati, N. Chayati, and F. M. L. Taqwa, "Korelasi Nilai Daya Dukung Ultimit Tiang Bor Hasil Analisis Dengan Hasil Pengujian Pda Test (Studi Kasus: Pembangunan Jalan Tol Bogor Ring Road Seksi Iii a Ruas Simpang Yasmin - Simpang Salabenda)," *J. Komposit*, vol. 4, no. 2, p. 43, 2022, doi: 10.32832/komposit.v4i2.3468.
- [6] N. Hataf and A. Shafaghat, "Optimizing the Bearing Capacity of Tapered Piles in Realistic Scale Using 3D Finite Element Method," *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 33, pp. 1465–1473, 2015, doi: 10.1007/s10706-015-9912-6.
- [7] B. Ozturk, A. Kodsý, Y. Bazi, and M. G. Iskander, "Efficacy of Several Design Methods for Predicting the Axial Compressive Capacity of Piles," *Transp. Res. Rec.*, pp. 1–17, 2023, doi: 10.1177/03611981231158335.
- [8] D. D. C. Nguyen, S.-B. Jo, and D.-S. Kim, "Design Method of Piled-raft Foundations Under Vertical Load Considering Interaction Effects," *Comput. Geotech.*, vol. 47, no. 1, pp. 16–27, 2013, doi: 10.1016/j.compgeo.2012.06.007.
- [9] H. Nagai, "Shaft Resistance of Piles Close to Backfilled Sand Columns," *Int. J. GEOMATE*, vol. 21, no. 84, pp. 121–128, 2021, doi: 10.21660/2021.84.j2170.
- [10] I. M. Dirgayusa, S. Ismanti, and A. Rifa'i, "Evaluasi Kapasitas Dukung Sistem Fondasi Tiang pada Tanah Pasir dengan Berbagai Metode Pemancangan pada Bangunan Monumental," Universitas Gadjah Mada, 2023.
- [11] G. G. Meyerhof, "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations," *ASCE J Geotech Eng Div*, vol. 102,

- no. 3, pp. 195–228, 1976, doi: 10.1061/ajgeb6.0000243.
- [12] H. G. Poulos and E. H. Davis, *Pile Foundation Analysis and Design*. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [13] H. Nagai and K. Nakamura, “Shaft Resistance Mechanism for Piles Close to Backfilled Sand and Its Evaluation,” *Int. J. GEOMATE*, vol. 23, no. 98, pp. 84–91, 2022, doi: 10.21660/2022.98.3461.
- [14] H. Rattez, Y. Shi, A. Sac-Morane, T. Klæyle, B. Mielniczuk, and M. Veveakis, “Effect of grain size distribution on the shear band thickness evolution in sand,” *Géotechnique*, vol. 72, no. 4, pp. 350–363, Apr. 2022, doi: 10.1680/jgeot.20.P.120.
- [15] M. Nitka and A. Grabowski, “Shear band evolution phenomena in direct shear test modelled with DEM,” *Powder Technol.*, vol. 391, pp. 369–384, 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2021.06.025.
- [16] X. Gu, M. Huang, and J. Qian, “Discrete element modeling of shear band in granular materials,” *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 72, no. 1, pp. 37–49, 2014, doi: 10.1016/j.tafmec.2014.06.008.
- [17] R. Kawamoto, E. Andò, G. Viggiani, and J. E. Andrade, “All you need is shape: Predicting shear banding in sand with LS-DEM,” *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 111, pp. 375–392, 2018, doi: 10.1016/j.jmps.2017.10.003.
- [18] G. Likins and F. Rausche, “What Constitutes a Good PDA Test?,” *Proc. Eighth Int. Conf. Appl. Stress Wave Theory to Piles*, pp. 403–407, 2008.