

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Tanah Lunak (*Soft Clay*)

Tanah adalah agregat alami dari butiran mineral yang dapat dipisahkan dengan sarana mekanis lembut seperti agitasi dalam air (Terzaghi et al., 1996). Tanah yang ideal adalah tanah yang memiliki kapasitas dukung serta stabilitas memadai untuk menopang beban bangunan di atasnya. Namun, kondisi tanah alami di lapangan sering kali tidak memenuhi persyaratan tersebut, sehingga diperlukan berbagai metode perbaikan tanah untuk meningkatkan karakteristik fisik dan indeks tanah agar mampu mendukung konstruksi secara aman dan efektif, salah satunya yaitu tanah lunak (Sibarani et al., 2025).

Tanah lunak adalah tanah kohesif yang didominasi partikel berukuran sangat halus seperti lempung dan lanau, yang secara alami memiliki kekuatan geser rendah, kompresibilitas tinggi, permeabilitas sangat kecil, serta daya dukung yang buruk (Siska & Yakin, 2016). Kondisi ini menyebabkan tanah lunak sering menimbulkan masalah dalam pekerjaan konstruksi, seperti penurunan diferensial, ketidakstabilan, dan perlunya penggunaan fondasi dalam atau teknik perbaikan tanah untuk memastikan keamanan struktur yang dibangun di atasnya.

Selain memiliki kuat geser yang rendah, tanah lunak juga bersifat sangat kompresibel sehingga mengalami penurunan konsolidasi dalam jangka waktu tertentu akibat beban di atasnya. Penurunan ini dapat terjadi lebih besar dibandingkan pergerakan fondasi tiang yang relatif kaku, sehingga menimbulkan perbedaan deformasi antara tanah dan tiang. Kondisi tersebut berpotensi memicu terjadinya gaya gesek negatif (*negative skin friction*) pada selimut tiang pancang. Oleh karena itu, pemahaman terhadap karakteristik tanah lunak, khususnya parameter kuat geser dan kompresibilitas, menjadi sangat penting dalam analisis perilaku fondasi tiang yang dibangun pada tanah lunak.

2.2 Parameter Tanah

Penentuan parameter tanah dapat dilakukan dengan 2 cara, yaitu: (1) membuat grafik hubungan yang didapatkan dari data laboratorium serta (2)

melakukan korelasi atau perhitungan dengan persamaan empiris. Rumus yang digunakan pada perkiraan korelasi parameter tanah sebagai berikut:

$$Y = \left(\frac{N - N_{bawah}}{N_{atas} - N_{bawah}} \right) \times (Y_{atas} - Y_{bawah}) + Y_{bawah} \quad (2.1)$$

1. Berat Isi Tanah (γ)

Berat isi tanah merupakan salah satu parameter yang terdapat dalam tanah yang merupakan perbandingan antara berat tanah dengan volume tanah. Tujuan dari pengujian ini yaitu untuk mengetahui kepadatan suatu tanah. Berat isi tanah dapat diperoleh dari pengujian yang dilakukan di laboratorium dengan rumus empiris korelasi menggunakan tabel di bawah ini.

Tabel 2.1 Berat Isi Tanah

<i>Soils Type</i>		<i>Bulk Unit Weight (kN/m³)</i>		<i>Saturated Unit Weight (kN/m³)</i>	
		<i>Loose</i>	<i>Dense</i>	<i>Loose</i>	<i>Dense</i>
<i>Granular Soils</i>	<i>Gravel</i>	16,0	18,0	20,0	21,0
	<i>Well graded sand and gravel</i>	19,0	21,0	21,5	23,0
	<i>Coarse or medium sand</i>	16,5	18,5	20,0	21,5
	<i>Well graded sand</i>	18,0	21,0	20,5	22,5
	<i>Fine or silty sand</i>	17,0	19,0	20,0	21,5
	<i>Rock fill</i>	15,0	17,5	19,5	21,0
	<i>Brick hardcore</i>	13,0	17,5	16,5	19,0
<i>Granular Soils</i>	<i>Slag fill</i>	12,0	15,0	18,0	20,0
	<i>Ash fill</i>	6,5	10,0	13,0	15,0

Soils Type		Bulk Unit Weight (kN/m³)		Saturated Unit Weight (kN/m³)	
		Loose	Dense	Loose	Dense
Cohesive Soils	<i>Peat (high variability)</i>	12,0		12,0	
	<i>Organic clay</i>	15,0		15,0	
	<i>Soft clay</i>	17,0		17,0	
	<i>Firm clay</i>	18,0		18,0	
	<i>Stiff clay</i>	19,0		19,0	
	<i>Hard clay</i>	20,0		20,0	
	<i>Stiff or hard glacial clay</i>	21,0		21,0	

2. Kohesi

Kohesi adalah gaya tarik menarik antara partikel dalam tanah, dinyatakan dalam satuan berat per satuan luas. Kohesi tanah akan semakin besar jika kekuatan gesernya makin besar. Nilai kohesi (c) diperoleh dari pengujian laboratorium yaitu pengujian kuat geser langsung (*direct shear strength test*) dan pengujian triaxial (*triaxial test*). Kohesi berbanding lurus dengan kerapatan suatu benda, sehingga bila kerapatan semakin besar maka kohesi yang akan didapatkan semakin besar.

Tabel 2.2 Nilai Kohesi Tanah

Consistency	N-SPT	Cu (kN/m²)
<i>Very Soft</i>	0 - 2	< 12
<i>Soft</i>	2 - 4	12 - 25
<i>Medium</i>	4 - 8	25 - 50
<i>Stiff</i>	8 - 15	50 - 100
<i>Very Stiff</i>	15 - 30	100 - 200

<i>Consistency</i>	N-SPT	Cu (kN/m²)
<i>Hard</i>	>30	>200

3. Sudut Geser Efektif (ϕ') dan Kohesi Efektif (c')

Sudut geser efektif (ϕ') adalah sudut yang menggambarkan ketahanan geser tanah yang berhubungan dengan sifat internal tanah, tanpa memperhitungkan tekanan air pori. Sudut ini penting dalam analisis mekanika tanah karena menunjukkan kemiringan lereng atau gaya geser yang dapat dicapai oleh tanah sebelum terjadi pergeseran atau longsoran. Sudut geser efektif ini diukur dalam kondisi kering atau apabila efek air dalam pori dianggap tidak ada. Sudut geser efektif (ϕ') berbeda dari sudut geser total yang memperhitungkan tekanan air pori dalam tanah yang dapat mengurangi kekuatan geser tanah.

Tabel 2.3 Nilai Perkiraan Kohesi Efektif dan Sudut Geser Efektif

<i>Soil group</i>	<i>Typical soils in group</i>	<i>Soil parameters</i>	
		c' (kPa)	ϕ' (degrees)
<i>Poor</i>	<i>Soft and firm clay of medium to high plasticity; silty clays; loose variable clayey fills; loose sandy silts</i>	0 - 5	17 - 25
<i>Average</i>	<i>Stiff sandy clays; gravelly clays; compact clayey sands and sandy silts; compacted clay fills</i>	0 - 10	26 - 32
<i>Good</i>	<i>Gravelly sands, compacted sands, controlled crushed sandstone and graveled fills, dense well graded sands</i>	0 - 5	32 - 37
<i>Very good</i>	<i>Weak weathered rock, controlled fills of road base, gravel and recycled concrete</i>	0 - 25	36 - 43

Tabel 2.4 Nilai Kohesi Efektif dan Sudut Geser

<i>Type</i>	<i>Soil description/state</i>	<i>Effective cohesion (kPa)</i>	<i>Friction angle (degrees)</i>
<i>Cohesive</i>	<i>Soft - organic</i>	5 - 10	10 - 20
	<i>Soft - non organic</i>	10 - 20	15 - 25
	<i>Stiff</i>	20 - 50	20 - 30
	<i>Hard</i>	50 - 100	25 - 30

4. Angka Pori (e_0)

Angka pori menunjukkan seberapa besar ruang kosong yang disebut pori-pori tanah terhadap ruang padat. Pori-pori inilah yang nanti akan terisi air atau butiran tanah yang lebih kecil, sehingga sifat dari tanah pun berubah. Nilai ini menggunakan persamaan rumus empiris korelasi antara Nilai SPT dengan tabel di bawah ini.

Tabel 2.5 Nilai Angka Pori

<i>Type of Soil</i>	<i>Void Ratio, e</i>	<i>Natural moisture content in saturated state (%)</i>	<i>Dry unit weight, γ_d kN/m³</i>
<i>Loose uniform sand</i>	0,8	30	14,5
<i>Dense uniform sand</i>	0,45	16	18
<i>Loose angular-grained silty sand</i>	0,65	25	16
<i>Dense angular-grained silty sand</i>	0,4	15	19
<i>Stiff clay</i>	0,6	21	17
<i>Soft clay</i>	0,9 – 1,4	30 - 50	11,5 – 14,5
<i>Loess</i>	0,9	25	13,5
<i>Soft organic clay</i>	2,5 – 3,2	30 - 120	6 - 8
<i>Glacial till</i>	0.5	10	21

5. Modulus Elastis (E)

Nilai modulus young menunjukkan besarnya nilai elastisitas tanah yang merupakan perbandingan antara tegangan yang terjadi terhadap regangan. Nilai ini bisa didapatkan dari Triaxial Test. Nilai Modulus Elastisitas (E) secara empiris dapat ditentukan dari jenis tanah dengan korelasi pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.6 Nilai Modulus Elastis

<i>Soil Type</i>	ES
	kN/m ²
<i>Soft clay</i>	1800 - 3500
<i>Hard clay</i>	6000 - 14000
<i>Loose sand</i>	10000 - 28000
<i>Dense sand</i>	35000 - 70000

6. Poisson Rasio (μ)

Nilai *poisson ratio* ditentukan sebagai rasio kompresi poros terhadap regangan pemuaian lateral. Nilai *poisson ratio* dapat ditentukan berdasar jenis tanah seperti yang terlihat pada Tabel di bawah ini.

Tabel 2.7 Nilai Poisson Ratio

<i>Material</i>	<i>Poisson's ratio</i>
<i>Saturated clays (undrained)</i>	0,5
<i>Saturated clays (drained)</i>	0,2 – 0,4
<i>Dense sand</i>	0,3 – 0,4
<i>Loose sand</i>	0,1 – 0,3
<i>Loess</i>	0,1 – 0,4
<i>Ice</i>	0,36
<i>Alumunium</i>	0,35

<i>Material</i>	<i>Poisson's ratio</i>
<i>Steel</i>	0,29
<i>Concrete</i>	0,15

7. Indeks

a. Indeks Kompresi (Cc)

Indeks Kompresi (Cc) adalah parameter yang menggambarkan seberapa besar perubahan volume tanah yang terjadi ketika tanah berada dalam kondisi terkompresi oleh beban yang meningkat. Secara teknis, Cc mengukur laju penurunan *void ratio* (perbandingan antara volume pori dan volume padatan) ketika tanah mengalami perubahan tekanan efektif pada tahap kompresi primer, yaitu fase pertama setelah tanah diberikan beban.

Tabel 2.8 Nilai Indeks Kompresi

<i>Type of clay</i>	<i>Descriptive term</i>	<i>Coefficient of volume compressibility, m_v (m^2/MN)</i>	<i>Compression indeks, Cc</i>
<i>Hard, heavily overconsolidated Glacial Till (Boulder Clay), stiff weathered rocks) and hard clays</i>	<i>Very low compressibility</i>	<0,05	0,025
<i>Stiff Glacial Till (Boulder Clay), marls, very stiff tropical residual clays</i>	<i>Low compressibility</i>	0,005-0,1	0,025-0,05

<i>Type of clay</i>	<i>Descriptive term</i>	<i>Coefficient of volume compressibility, m_v (m^2/MN)</i>	<i>Compression indeks, C_c</i>
<i>Firm clays, glacial outwash clays, consolidated lake deposits, weathered marls, firm glacial till, normally consolidated clays at depth, firm tropical residual clays</i>	<i>Medium compressibility</i>	0,1-0,3	0,05-0,15
<i>Poorly consolidated alluvial clays such as estuarine deposits, and sensitive clays</i>	<i>High compressibility</i>	0,3-1,5	0,15-0,75
<i>Highly organic alluvial clays and peats</i>	<i>Very high compressibility</i>	>1,5	0,75-5+

Tabel 2.9 Nilai Indeks Kompresi Menggunakan Nilai LL (*Liquid Limit*)

<i>Correlation</i>	<i>Comments</i>	<i>References</i>
$C_c = 0,009 (LL-10)$	<i>Undisturbed clay of sensitivity less than 4. Reliability + 30 %</i>	Terzaghi and Peck (1948)
$C_c = 0,007 (LL-10)$	<i>Remoulded clay</i>	Skempton (1944)
$C_c = 0,0046 (LL-9)$	<i>Sao Paulo, Brazil clays</i>	Cozzolino (1961)

<i>Correlation</i>	<i>Comments</i>	<i>References</i>
$C_c = 0,0186 \text{ (LL-30)}$	<i>Soft silty Brazilian clays</i>	Cozzolino (1961)
$C_c = 0,01 \text{ (LL-13)}$	<i>All clays</i>	USACE (1990)

b. Indeks Rekompresi (C_s)

Indeks Rekompresi (C_s) adalah indeks yang menggambarkan kompresibilitas tanah pada fase rekompresi, yaitu ketika tanah yang sebelumnya terkompresi atau sudah mengalami konsolidasi kembali diberikan beban tambahan, tetapi dengan perubahan tekanan yang lebih rendah dibandingkan dengan fase kompresi primer. Dalam kondisi ini, tanah akan mengalami kompresi tambahan yang lebih kecil dibandingkan dengan kompresi primer. C_s menggambarkan besarnya perubahan *void ratio* selama rekompresi.

$$C_s \approx \frac{1}{5} \text{ to } \frac{1}{10} C_c \quad (2.2)$$

8. Permeabilitas

a. Koefisien Permeabilitas arah Vertikal (K_v)

Koefisien Permeabilitas Vertikal (k_v) adalah ukuran dari kemampuan tanah untuk mengalirkan air dalam arah vertikal, yaitu melalui lapisan tanah secara tegak lurus terhadap permukaan tanah. Koefisien ini sangat penting dalam analisis konsolidasi tanah dan drainase vertikal, yang dapat mempengaruhi pergerakan air tanah di dalam lapisan tanah yang terkompresi atau tertutup oleh lapisan kedap air.

Tabel 2.10 Nilai Permeabilitas Arah Vertikal

<i>Soil type</i>	k
	cm/sec
<i>Clean gravel</i>	100 – 1,0
<i>Coarse sand</i>	1,0 – 0,01

<i>Soil type</i>	k
	cm/sec
<i>Fine sand</i>	0,01 – 0,001
<i>Silty clay</i>	0,001 – 0,00001
<i>Clay</i>	<0,000001

b. Koefisien Permeabilitas arah Horizontal (K_h)

Koefisien Permeabilitas Horizontal (k_h) adalah ukuran dari kemampuan tanah untuk mengalirkan air dalam arah horizontal, yaitu sejajar dengan permukaan tanah. Koefisien ini penting untuk analisis aliran air tanah di bawah lapisan tanah atau dalam studi tentang pergerakan air dalam akuifer atau lapisan tanah berpori secara lateral. Untuk nilai K_h bisa menggunakan Tabel 2.11.

Tabel 2.11 Hubungan Antara Koefisien dari Permeabilitas dan Konsolidasi

<i>Parameter</i>	<i>Symbol and relationship</i>
<i>Coefficient of vertical consolidation</i>	$C_v = k/(m_v \gamma_w)$
<i>Coefficient of permeability</i>	K
<i>Unit weight of water</i>	γ_w
<i>Coefficient of compressibility</i>	m_v
<i>Coefficient of horizontal consolidation</i>	$C_h = 2 \text{ to } 10 C_v$
<i>Coefficient of vertical permeability</i>	k_v
<i>Coefficient of horizontal permeability</i>	$k_h = 2 \text{ to } 10 k_v$

2.3 Fondasi Tiang Pancang

Fondasi adalah elemen struktur bawah yang berhubungan langsung dengan tanah dan berfungsi menahan serta menyalurkan beban dari struktur di atasnya (Rochim et al., 2023). Salah satu jenis fondasi yaitu fondasi tiang pancang. Fondasi tiang pancang (*pile foundation*) merupakan elemen fondasi berbentuk tiang yang

dipasang pada lapisan tanah pendukung dan berfungsi menerima serta mengalirkan beban struktur atas ke tanah yang memiliki daya dukung lebih baik pada kedalaman tertentu (Nugroho et al., 2022).

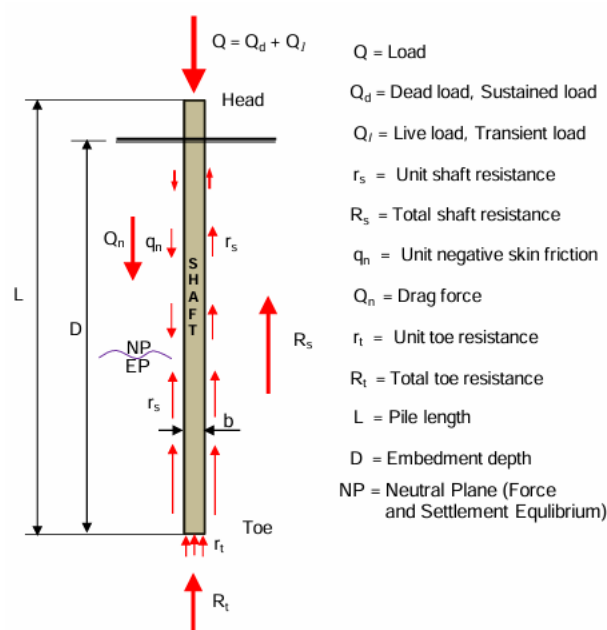


Gambar 2.1 Fondasi Tiang Pancang

(Sumber: Sofia, 2026)

Sebuah tiang pancang dapat menggeser sebagian tanah di sekitarnya saat dipancang tanpa mengubah tingkat kepadatan tanah tersebut, sementara bagian tanah lainnya justru bisa mengalami pemadatan. Ujung tiang dapat menembus hingga ke lapisan pasir padat yang mampu menahan beban sebagai tumpuan ujung, namun meskipun demikian, sebagian besar beban biasanya tetap dipikul oleh gesekan sepanjang sisi tiang (Terzaghi et al., 1996). Kedua mekanisme ini pada dasarnya membentuk kapasitas daya dukung total tiang pancang. Kapasitas daya dukung aksial tiang terdiri dari kontribusi gesekan sisi (*skin friction*) dan tahanan ujung (*end bearing*) (Ahmad & Surahman, 2016).

Kemampuan tiang menahan beban ini tidak lepas dari bagaimana tegangan didistribusikan dalam massa tanah di sekitarnya. Kontribusi dari gesekan sisi ini didasarkan pada prinsip distribusi tegangan aksial di sepanjang tiang. Distribusi tegangan aksial sepanjang tiang tidak seragam dan dipengaruhi oleh interaksi gesekan antara tanah dan permukaan tiang (Kuilen et al., 2024). Pada dasarnya, distribusi tegangan tanah merupakan penambahan tegangan akibat dari pengaruh beban tambahan di atas tanah yang ditinjau pada tengah lapisan.



Gambar 2.2 Pemindahan beban ke tiang pancang dan dari tiang pancang ke tanah.

(Sumber: Fellenius, 2025)

2.4 Daya Dukung Fondasi Tiang Pancang

Daya dukung fondasi tiang pancang merupakan kemampuan fondasi dalam menahan beban aksial yang bekerja tanpa mengalami keruntuhan atau penurunan yang berlebihan. Secara umum, daya dukung ultimit fondasi tiang pancang terdiri atas dua komponen utama, yaitu daya dukung ujung tiang (*end bearing capacity*, Q_b) dan daya dukung selimut tiang (*skin resistance*, Q_s) (Ahmad & Surahman, 2016).

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s \quad (2.3)$$

Dimana:

Q_{ult} = Daya dukung ultimit

Q_p = Daya dukung ujung

Q_s = Daya selimut

2.4.1 Daya Dukung Ujung

Daya dukung ujung tiang (Q_b) merupakan kontribusi tahanan yang bekerja pada ujung bawah tiang akibat interaksi antara ujung tiang dan lapisan tanah pendukung. Besarnya Q_b dipengaruhi oleh jenis tanah, kekuatan tanah di sekitar ujung tiang, serta kondisi lapisan tanah pendukung tempat tiang bertumpu (Das, 2018). Daya dukung ujung dihitung dengan metode Meyerhof (1976) karena karakteristik tanah pada lokasi penelitian didominasi oleh 2 jenis material tanah, yaitu lempung dan pasir.

Untuk pada tanah lempung digunakan persamaan:

$$Q_p = (c \cdot N_c) \cdot A_p \quad (2.4)$$

$$Q_p = 9 \cdot C \cdot A_p \quad (2.5)$$

Dimana:

Q_p = Kapasitas dukung ujung tiang (kN)

C = Cohesi undrained (kN/m²)

A_p = Luas penampang ujung tiang (m²)

Sedangkan untuk tanah pasir menggunakan persamaan:

$$Q_p = q_p \cdot A_p \quad (2.6)$$

$$q_p = 40 \cdot N_{60} \cdot L/D \leq 400 \cdot N_{60} \quad (2.7)$$

Dimana:

q_p = Kapasitas dukung ujung tiang (kN)

A_p = Luas penampang ujung tiang (m²)

2.4.2 Daya Dukung Selimut

Daya dukung selimut tiang (Q_s) merupakan tahanan gesek yang berkembang di sepanjang permukaan tiang akibat interaksi antara tanah dan selimut

tiang. Besarnya Q_s dipengaruhi oleh sifat mekanik tanah, kondisi permukaan tiang, serta panjang bagian tiang yang tertanam di dalam tanah (Bowles, 1997).

Untuk pada tanah lempung persamaan yang digunakan:

$$Q_s = \alpha \times C_u \times p \times L_i \quad (2.8)$$

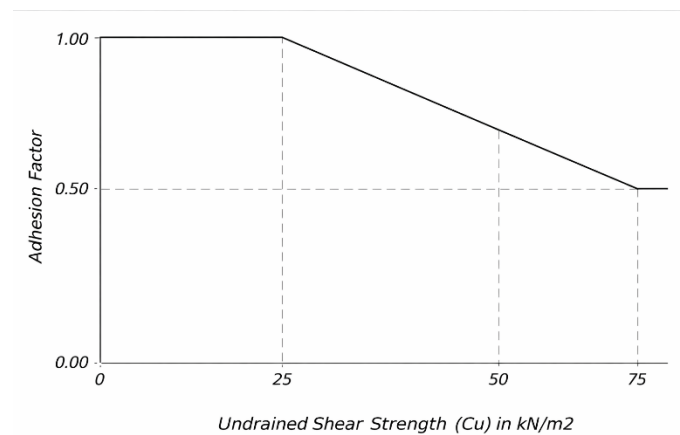
Dimana:

α = Faktor adhesi

C_u = Cohesi undrained (kN/m^2)

L_i = Tebal tanah (m)

Menentukan faktor adhesi (α) terhadap Kuat geser (C_u) dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 2.3 Hubungan Antara Fakotr Adhesi (α) terhadap Kuat Geser (C_u)

(Sumber: Bowles, 1997)

Sedangkan pada tanah pasir digunakan persamaan β dari Fellenius (1991):

Persamaan dasar metode β untuk tahanan selimut satuan adalah:

$$\tau_s = \beta \times \sigma'_v \quad (2.9)$$

dan daya dukung selimut total:

$$Q_s = \tau_s \times A_s \quad (2.10)$$

Dengan:

τ_s = Tegangan geser selimut(kPa)

β = Koefisien gesekan selimut

σ'_v = Tegangan vertikal efektif (kPa)

A_s = Luas permukaan selimut tiang (m^2)

Nilai β yang direkomendasikan Fellenius (1991) dapat dilihat pada tabel dibawah.

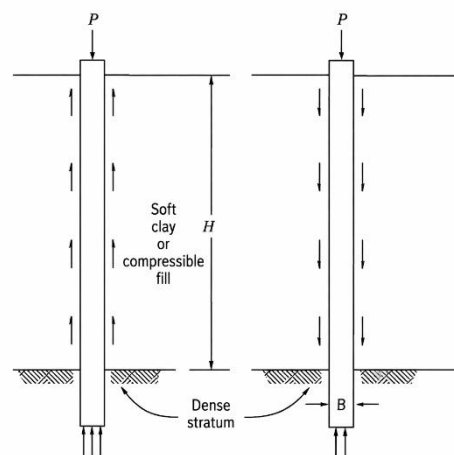
Tabel 2.12 Harga Nilai β

Jenis Tanah	β
Lempung	0,20 – 0,25
Lanau	0,25 – 0,35
Pasir	0,35 – 0,50

2.5 Mekanisme *Negative Skin Friction*

Positive Skin Friction terjadi ketika tiang bergerak turun lebih cepat daripada tanah di sekitarnya, sehingga gesekan antara tanah dan tiang membantu menahan beban struktur di atasnya, ini meningkatkan kapasitas dukung tiang (Gen et al., 2022). Sedangkan *negative skin friction* menghasilkan gaya tarik ke bawah (*dragload*) pada tiang, yang dapat mengurangi kapasitas dukung efektif dan menyebabkan penurunan tambahan pada struktur (Wu et al., 2022). *Negative skin friction* terjadi ketika tanah di sekitar tiang mengalami penurunan yang lebih besar dibandingkan dengan penurunan tiang itu sendiri (Indraratna et al., 1992). Penyebab utamanya adalah konsolidasi tanah lunak akibat penempatan beban tambahan (*surcharge*), penurunan muka air tanah, dan rekonsolidasi tanah setelah pemancangan tiang (Kiprotich, 2015).

Ketika kondisi ini terjadi, tiang pancang harus mampu menopang berat tanah maupun semua beban lain yang dirancang untuk ditanggung. Selain itu, jika timbunan akan ditempatkan di sekitar pondasi tiang pancang yang sudah ada, kemampuan tiang pancang untuk menanggung beban tambahan harus diselidiki secara menyeluruh. Beban akibat gesekan selimut negatif (*negative skin friction*) sering kali besar, karena nilai gesekan selimut negatif satuan bisa sama besarnya dengan nilai positif (*positive skin friction*) (Prakash, 1990).



Gambar 2.4 Skema Gaya-Gaya yang Bekerja pada Tiang, Menunjukkan Gesekan *Negatif* (panah geser ke bawah) dan Gesekan Sisi Positif (panah geser ke atas)

(Sumber: Fellenius, 2025)

Gesekan kulit negatif menyebabkan penurunan kapasitas dukung tiang serta peningkatan tegangan tekan di dalam tiang. Gaya geser ini menarik tiang mengikuti penurunan tanah dan menghasilkan beban tambahan yang disebut *dragload* (Fellenius & Eng, 1984). Sebagai hasilnya, gesekan kulit negatif dapat menyebabkan kegagalan layan (*serviceability failure*) akibat penurunan yang berlebihan pada tiang dukung geser (*shaft bearing piles*) atau kegagalan struktural pada tiang dukung ujung (*end bearing piles*). Dalam kebanyakan kasus tiang dengan beban seret, kriteria kelayakan menjadi penentu dalam desain (Kiprotich, 2015).

Untuk dapat mengkuantifikasi besarnya gaya gesek negatif yang bekerja pada tiang pancang, diperlukan pendekatan analitis yang mampu merepresentasikan

interaksi antara tanah dan tiang akibat penurunan tanah. Besarnya gaya *negative skin friction* dihitung menggunakan metode Prakash dan Sharma (1990), yang menyatakan bahwa gaya gesek negatif merupakan fungsi dari tegangan vertikal efektif, sudut geser dalam efektif tanah, serta tebal efektif lapisan tanah yang mengalami konsolidasi. Besarnya *negative skin friction* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Q_{neg} = \pi D (K \sigma'_v \tan \varphi') L_e \quad (2.11)$$

Dengan:

K = Koefisien tekanan lateral tanah = $1 - \sin \varphi'$

φ' = Sudut geser efektif

σ'_v = Tegangan vertikal efektif

L_e = Tebal efektif lapisan tanah yang mengalami konsolidasi

D = Diameter Tiang

Prakash & Sharma (1990) mengusulkan tebal efektif lapisan tanah yang mengalami konsolidasi tersebut dengan menggunakan persamaan:

$$L_e = 0.75 L_c \quad (2.12)$$

Dengan:

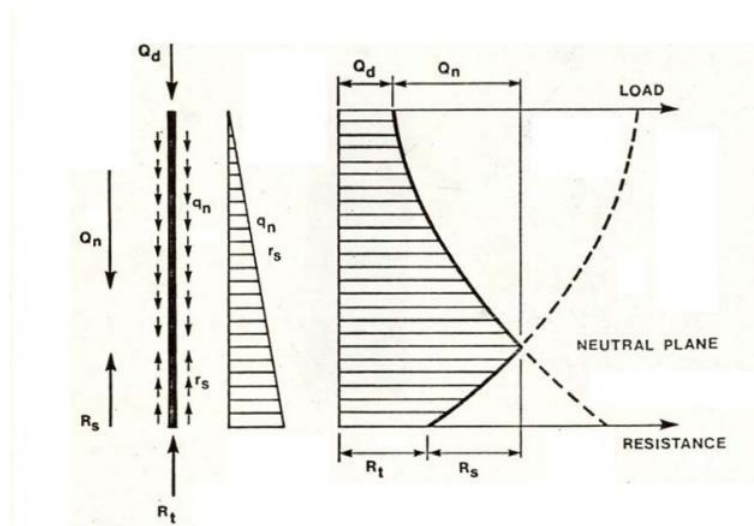
L_c = Tebal total lapisan tanah yang mengalami konsolidasi

2.6 Posisi Titik Netral (*Neutral Plane*)

Lokasi neutral plane pada suatu tiang fondasi bersifat dinamis, di mana posisinya akan bergeser seiring dengan perubahan beban yang diberikan pada kepala tiang. Pergeseran ini secara langsung memengaruhi besarnya *dragload* yang terjadi (Pintor T Simatupang, 2011). *Neutral plane* adalah kedalaman pada tiang di mana gesekan selimut negatif berubah menjadi tahanan geser positif sehingga gaya

pada tiang berada dalam kondisi seimbang (Fellenius & Eng, 1984). Distribusi beban layan yang bekerja pada tiang dinyatakan sebagai Q_d dan diasumsikan bekerja pada tanah yang relatif homogen, di mana tegangan geser sepanjang selimut tiang akibat perpindahan relatif merupakan fungsi dari tegangan efektif tanah penutup. Kondisi analisis mengasumsikan bahwa tekanan pori berlebih telah terdisipasi dan distribusi tekanan pori bersifat hidrostatik. Untuk penyederhanaan, tegangan geser sepanjang tiang dianggap tidak bergantung pada arah perpindahan, sehingga besarnya gesekan selimut negatif (q_n) diasumsikan sama dengan tahanan geser positif (r_s), serta diasumsikan pula bahwa tahanan ujung tiang (R_t) bekerja (Pintor T Simatupang, 2011).

Dalam kondisi tersebut, lokasi *neutral plane* ditentukan sebagai titik perpotongan dua kurva distribusi beban, yaitu kurva beban yang ditarik dari kepala tiang ke bawah akibat beban layan dan gesekan selimut negatif, serta kurva tahanan yang ditarik dari ujung tiang ke atas akibat tahanan ujung dan tahanan geser positif, sehingga tercapai keseimbangan gaya sepanjang tiang (Fellenius & Eng, 1984).

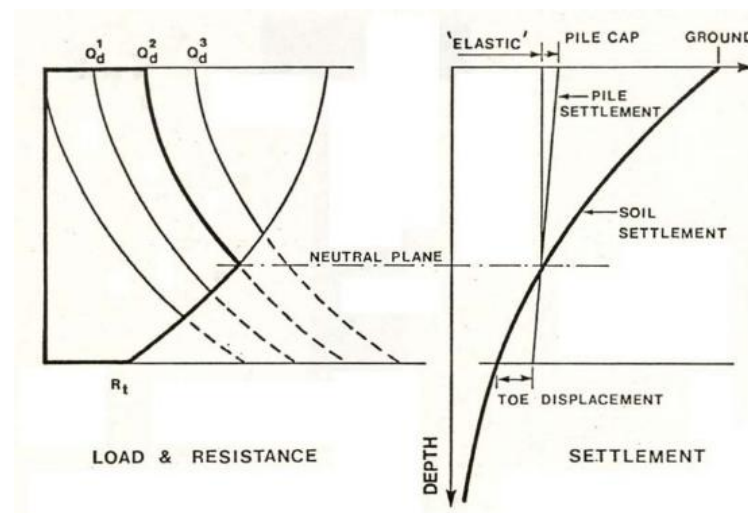


Gambar 2.5 Definisi dan diagram neutral plane

(Sumber: Fellenius & Eng, 1984)

Dalam studi ini, penentuan letak bidang netral (*neutral plane*) dilakukan melalui pendekatan menggunakan persamaan Prakash dan numerik berbasis

Metode Elemen Hingga (FEM). Langkah ini diambil untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif dibandingkan penggunaan rumus analitik konvensional, seperti persamaan Prakash yang mematok posisi titik netral secara statis pada kedalaman $0,75 \times L_c$. Sejalan dengan pemikiran Comodromos dan Bareka (2005) serta Tan dan Fellenius (2026), model konvensional yang terlalu menyederhanakan parameter sering kali menghasilkan prediksi yang kurang presisi. Hal ini dikarenakan metode tersebut gagal menangkap fenomena distribusi regangan tanah secara kontinu serta dinamika interaksi tanah-struktur (*soil-structure interaction*) yang terjadi di sepanjang selimut tiang selama masa konsolidasi.



Gambar 2.6 Menentukan *settlement* tiang

(Sumber: Fellenius & Eng, 1984)

2.7 Pengaruh Variasi Ketebalan Tanah Lunak

Ketebalan lapisan tanah lunak merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi tingkat penurunan tanah akibat beban yang ada di atasnya. Jika lapisan tanah lunak semakin tebal, maka volume tanah yang mengalami kompresi selama proses konsolidasi akan semakin besar, sehingga tingkat penurunan total yang terjadi juga cenderung meningkat. Hal ini disebabkan oleh sifat tanah lunak yang mudah mengalami kompresi dan sulit mengalirkan air, sehingga penurunan terjadi secara perlahan dalam jangka waktu tertentu. Hubungan antara ketebalan lapisan tanah lunak dengan tingkat penurunan tanah sangat penting dalam

merencanakan fondasi, terutama di daerah yang dominan memiliki tanah lempung lunak.

Penambahan ketebalan lapisan tanah lunak tidak hanya memengaruhi besar penurunan tanah, tetapi juga mempengaruhi perubahan gaya gesek pada selimut tiang pancang. Ketika tanah lunak mengalami penurunan lebih besar dibandingkan dengan pergerakan tiang, maka akan muncul gaya gesek negatif (*negative skin friction*) yang bekerja ke bawah sepanjang selimut tiang. Semakin tebal lapisan tanah lunak, semakin panjang area tanah yang mengalami penurunan terhadap tiang, sehingga besarnya gaya gesek negatif yang terbentuk juga meningkat (Fellenius, 2025). Dengan demikian, variasi ketebalan tanah lunak berbanding lurus dengan potensi peningkatan *negative skin friction* pada fondasi tiang pancang.

Selain itu, variasi ketebalan tanah lunak juga memengaruhi besarnya beban tambahan yang harus dibawa oleh tiang pancang. Gaya gesek negatif akibat penurunan tanah dianggap sebagai beban tambahan berupa beban aksial (*downdrag load*) yang bekerja bersama dengan beban struktur. Semakin tebal lapisan tanah lunak, semakin besar beban tambahan akibat *negative skin friction*, sehingga kapasitas aksial efektif tiang akan berkurang (El-mossallamy & Morsy, 2013). Oleh karena itu, dalam merencanakan fondasi tiang di tanah lunak, pengaruh variasi ketebalan lapisan tanah harus dianalisis dengan teliti agar tiang mampu menahan gabungan beban struktur dan beban tambahan akibat *negative skin friction* secara aman.

2.8 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga (*Finite Element Method* / FEM) merupakan salah satu pendekatan numerik yang banyak digunakan dalam analisis permasalahan teknik, khususnya pada kondisi geometri yang tidak sederhana dan material yang menunjukkan perilaku kompleks. Analisis FEM memberikan alat yang sangat efektif untuk mempelajari perilaku interaksi tiang/tanah pada tiang yang mengalami kondisi akibat tanah yang turun setelah tiang dipasang (Tan & Fellenius, 2026). Konsep dasar metode ini adalah memodelkan suatu sistem kontinu, seperti massa tanah dan struktur fondasi, ke dalam sejumlah elemen diskrit yang saling berinteraksi (Putri et al., 2025). Melalui pendekatan tersebut, respons sistem

terhadap beban dapat dianalisis berdasarkan keseimbangan gaya dan hubungan mekanika material. Pada penelitian ini untuk mengaplikasikan metode elemen hingga, digunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga.

Perangkat lunak ini merupakan alat analisis yang dikembangkan dengan pendekatan metode elemen hingga dan digunakan untuk mengevaluasi deformasi serta interaksi tanah–struktur dalam pemodelan numerik. Dalam analisis fondasi tiang pancang yang dibangun di atas tanah lunak, perangkat lunak ini memungkinkan pemodelan elemen tanah dan tiang secara simultan, termasuk dengan mempertimbangkan proses konsolidasi tanah. Melalui pendekatan tersebut, fenomena seperti *negative skin friction*, penentuan posisi titik netral (*neutral plane*), serta evaluasi daya dukung aksial fondasi tiang pancang dapat dianalisis secara lebih mendekati kondisi aktual di lapangan, dengan memperhatikan tahapan pembebanan dan karakteristik tanah pendukung.

Penentuan titik netral pada metode elemen hingga dilakukan berdasarkan hubungan deformasi antara penurunan tanah di sekitar tiang dan penurunan tiang pancang sepanjang kedalaman tertentu (Liu et al., 2012). Titik netral didefinisikan sebagai kedalaman dimana penurunan tanah dan penurunan tiang memiliki nilai yang sama sehingga tidak terjadi pergerakan relatif antara tanah dan tiang. Secara mekanis, titik ini menandakan kondisi tanpa pergerakan relatif sekaligus menjadi lokasi akumulasi beban aksial tertinggi atau *dragload* (Drbe et al., 2016). Penggunaan analisis numerik memungkinkan peneliti mengevaluasi parameter antarmuka (*interface*) dan kekakuan lapisan pendukung secara lebih mendalam, di mana profil penurunan tanah dimodelkan secara otomatis oleh sistem untuk menentukan variasi titik netral (El-mossallamy & Morsy, 2013). Dengan demikian, penerapan FEM berfungsi sebagai instrumen validasi untuk menentukan kesetimbangan titik netral secara aktual, guna meminimalisir risiko kesalahan desain yang mungkin timbul dari penggunaan asumsi empiris yang tidak relevan dengan kondisi lapangan.