

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah

2.1.1 Pengertian Tanah

Tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari partikel mineral padat yang tidak terikat secara kimia dan terletak di atas batuan dasar (*bedrock*), terbentuk melalui proses pelapukan batuan secara fisik, kimia, atau biologis. Tanah memiliki karakteristik yang bervariasi tergantung pada jenis mineral, ukuran dan distribusi partikel, serta kandungan air, yang secara langsung memengaruhi sifat mekanisnya seperti kekuatan geser (*shear strength*), kompresibilitas (*compressibility*), dan permeabilitas (*permeability*). (Braja M & Khaled, 2014)

2.1.2 Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah didefinisikan sebagai proses pengelompokan tanah ke dalam kategori tertentu berdasarkan sifat-sifat fisik dan perilakunya. Tujuan utama dari klasifikasi tanah adalah untuk memprediksi perilaku tanah dalam kondisi tertentu memudahkan komunikasi antara insinyur geoteknik dan memberikan panduan dalam pemilihan metode konstruksi yang tepat. Sistem klasifikasi tanah yang umum digunakan meliputi *Unified Soil Classification System* (USCS) dan *AASHTO Classification System*. Dalam sistem ini tanah diklasifikasikan berdasarkan ukuran partikel, plastisitas, gradasi, dan karakteristik lainnya seperti kompresibilitas, permeabilitas, dan kekuatan geser. (Braja M & Khaled, 2014)

Klasifikasi tanah adalah proses pengelompokan tanah berdasarkan karakteristik fisik dan mekaniknya seperti ukuran partikel, distribusi gradasi, plastisitas, dan kompresibilitas. Sistem klasifikasi tanah bertujuan untuk menyederhanakan deskripsi tanah dan memprediksi perilakunya dalam aplikasi rekayasa geoteknik. (Najdanovic & Obradovic, 1981)

Tanah berbutiran halus berupa tanah lempung (*clay* dilambangkan dengan C) dengan ukuran butiran $<0,002$ mm dan lanau (*silty* dilambangkan M) berdiameter sekitar 0,006-0,002mm, sedangkan untuk tanah berbutiran kasar perbedaan yang

lebih rinci dibuat menurut ukuran partikel. Pasir (*sand* dilambangkan S) apabila diameter butiran berkisar 2-0, mm adalah pasir kasar, diameter antara 0,6-0,2 mm adalah pasir sedang, dan pasir halus jika diameter berkisar 0,2-0,06 mm. Kerikil (*gravel* dilambangkan G) yang berdiameter >2mm.(Braja M & Khaled, 2014)

Tabel 1 Klasifikasi Tanah USCS

<i>Major Division</i>			<i>Symbol</i>	<i>Typical Name</i>	<i>Clasifications Criteria for Coarse Grained Soil</i>	
<i>Fine-Grained Soil (more than half of materials is larger than No.200)</i>	<i>Gravels (more than half of Coarse Fraction is Large than No.4 Sieve Size)</i>	<i>Clean Gravel (little or fines)</i>	<i>GW</i>	<i>Well-Graded Gravels, Gravel Sand Mixtures, Little or No Fines</i>	$Cu \geq 4 \quad 1 \leq Cc \leq 3$	
			<i>GP</i>	<i>Poorly Graded Gravels, Gravel Sand Mixtures, Little or No Fines</i>	<i>Not meeting all gradation requirement for GW ($Cu < 4$ or $1 > Cc > 3$)</i>	
		<i>Gravels with fines (appercible)</i>	<i>GM</i>	<i>Silty Gravels, Gravel Sand Silty Mixture</i>	<i>Atterberg Limits below A line or $I_p < 4$</i>	<i>Above A line with $4 < I_p < 7$ are borderline cases requiring use of dual symbols</i>
			<i>GC</i>	<i>Clayed Gravels, Gravel Sand Clay Mixture</i>	<i>Atterberg Limits below A line or $I_p < 7$</i>	
	<i>Sans (more than half of Coarse Fraction is smaller No.4)</i>	<i>Clean sand (little or no fines)</i>	<i>SW</i>	<i>Well Graded Sand, Gravely Sand, Little or No Fines</i>	$Cu \geq 6 \quad 1 \leq Cc \leq 3$	

Major Division			Symbol	Typical Name	Clasifications Criteria for Coarse Grained Soil	
			SP	Poorly Graded Sand, Gravelly Sands, Little or No Fines	Not meeting all gradation requirement for SW (Cu<6 or 1>Cc>3	
		Sand with fines (appreciable)	SM	Silty Sand, Sand Silty Mixture	Atterberg Limits below A line or Ip<4	Above A line with 4<Ip<7 are borderline cases requiring use of dual symbols
			SC	Clayey Sand, Sand Silty Mixtured	Atterberg Limits below A line or Ip<7	
Fine-Grained Soil (more than half of materials is	Sity and Clayes (Liquid limit <50)		ML	Inorganic Silty and Very Fine Sand, Rock Flour, Silty or Clayey Fine Sands or Clayey Silty With Slight Plasticity	1. Determine percentages of Sand and Graven from Grainsize curve. 2. Depending on percentages of fines (fraction, smaller than 200 sieve size). Coarse grained soil are classfied as	

<i>Major Division</i>		<i>Symbol</i>	<i>Typical Name</i>	<i>Classifications Criteria for Coarse Grained Soil</i>
		<i>CL</i>	<i>inorganic Clays of Very Low to Medium Plasticity, Gravelly Clays, Sand Clays, Silty Clays, Lean Clays</i>	<i>follow: Less than 5%- GW, SW, SP More than 12%-GM, GC, SM, SC 5 to 12%- Borderline cases requiring dual symbol</i>
		<i>OL</i>	<i>Organic Silty and Organic Silty Clays of Low Plasticity</i>	
	<i>Silty and Clays (Liquid limit > 50)</i>	<i>MH</i>	<i>Inorganic Sils, Micaceous or Diatomaceous Fine Sandy or Silty Soils, Elastic Silty</i>	
		<i>CH</i>	<i>Inorganic Clays or High Plasticit, Fat Clays</i>	
		<i>OH</i>	<i>organic Clays of Medium to High Plasticity, Organic Silty</i>	
	<i>Highly Organic Soils</i>	<i>pT</i>	<i>Peat and Other Highly Organic Soils</i>	

(Sumber : Warman, 2019)

Tabel 2 Klasifikasi Tanah AASHTO

<i>General clasification</i>	<i>Granular material (35% or less of total sample passing No.200 sieve)</i>						
	<i>A-1</i>			<i>A-2</i>			
<i>Group classification</i>	<i>A-1-a</i>	<i>A-1-b</i>	<i>A-3</i>	<i>A-2-4</i>	<i>A-2-5</i>	<i>A-2-6</i>	<i>A-2-7</i>

General clasification	Granular material (35% or less of total sample passing No.200 sieve)							
	A-1			A-2				
sieve analysis (percent passing)								
No.10	50max							
No.40	30max	50max	50min					
No.200	15max	25max	10max	35max	35max	36max	37max	
Characteristics of fraction passing								
No.40								
Liquid limit				40max	41min	40max	41min	
Plasticity index	6max	NP		10max	10max	11min	11min	
Usual types of significant	Stone fragments,graven , and sand		Fine sand	siity or clayey graven and sand				
constituent material								
General subgrade rating	Excellent to good							
General classification	Silty-clay materials (more than 35% or total sample passing No.200 sieve)							
Grup Classification								A-7
								A-7-5
	A-4	A-5		A-6			A-7-6	
Sieve analysis (percent passing)								
No.10								
No.40								
No.200	36 min	36 min		36 min			36 min	
Characteristics of fraction passing								
No.40								
Liquid limit	40max	41 min		40max			41 min	
Plasticity index	10max	10max		11max			11max	
usual types of significant	Silty soils				Clayey soils			
constituent materials								
General subgrade rating	Fair to poor							

(Sumber : Warman, 2019)

2.1.3 Penyelidikan Tanah

Penyelidikan tanah adalah proses pengumpulan data dan informasi tentang sifat-sifat fisik dan mekanik tanah di lapangan dan laboratorium, Tujuan utama penyelidikan tanah adalah untuk memahami karakteristik tanah, menentukan parameter desain dan memprediksi perilaku tanah dalam aplikasi rekayasa geoteknik.(Braja M & Khaled, 2014)

Menurut Terzaghi dan Peck penyelidikan tanah yaitu serangkaian kegiatan yang dilakukan untuk mengidentifikasi sifat-sifat tanah dan kondisi lapisan tanah di suatu lokasi. Proses ini mencakup pengambilan sampel tanah uji lapangan dan analisis laboratorium.(Najdanovic & Obradovic, 1981)

Penyelidikan tanah adalah proses sistematis untuk mengumpulkan data dan informasi tentang sifat-sifat fisik dan mekanik tanah, yang bertujuan untuk mendukung perencanaan dan desain konstruksi. Menurut (SNI 4153, 2008) penyelidikan tanah dilakukan untuk mengidentifikasi sifat-sifat tanah, menentukan parameter desain geoteknik, dan mengevaluasi potensi masalah geoteknik seperti penurunan (*settlement*) dan stabilitas lereng.

Terdapat dua jenis penyelidikan tanah (*Soil Investigation*) yaitu :

1. Penyelidikan di laboratorium (*laboratory test*) Penyelidikan tanah di laboratorium terdiri dari berbagai cara antara lain dengan uji *index properties* tanah (*Atteberg Limit, Sieve Analysus, Spesific Gravity, Water Content*) dan *engineering properties* tanah (*Direct Shear Test, Consolidation Test, Compaction Test, Permeability Test, CBR, dan Triaksial Test*).
2. Penyelidikan di lapangan (*in situ test*)

Dalam (SNI 8460, 2017) Program penyelidikan lapangan harus meliputi :

- a) Rencana lokasi titik penyelidikan termasuk jenis penyelidikan;
- b) Kedalaman penyelidikan;
- c) Jenis contoh tanah yang akan diambil termasuk spesifikasi untuk jumlah dan kedalaman pada lokasi contoh tanah harus diambil;
- d) Spesifikasi pengukuran air tanah;

- e) Jenis peralatan yang akan digunakan;
- f) Standar yang akan diterapkan.

Penyelidikan tanah di lapangan terdapat beberapa cara antara lain dengan pengeboran (*hand boring* maupun *machine boring*). *Sand Cone Test*, *Standard Penetration Test (SPT)*, *Cone Penetration Test (CPT)*, dan *Dynamic Cone Penetration*.

Pengambilan contoh tanah pada penyelidikan tanah setidaknya satu lubang bora atau galian uji (*test pit*) harus tersedia untuk identifikasi dan klasifikasi tanah. Contoh tanah harus diperoleh dari setiap lapisan tanah yang dapat mempengaruhi perilaku struktur. Jumlah penyelidikan tanah di lapangan untuk struktur jembatan mengacu pada (SNI 8460, 2017) pada tanah adalah sebagai berikut : Jumlah minimum penyelidikan tanah Jenis Struktur Jumlah minimum penyelidikan tanah Jembatan - Untuk jembatan konvensional dengan bentang 50 m atau jembatan di laut : ditentukan oleh tenaga ahli geoteknik. (SNI 8460, 2017)

2.1.3.1 Standart Penetrasi Test (SPT)

Menurut standar dari (ASTM D1586, 2018) (*American Society for Testing and Materials*), *Standard Penetration Test (SPT)* merupakan metode pengujian penetrasi dinamis untuk mengetahui kekuatan relatif tanah dan klasifikasinya dengan cara menghitung jumlah pukulan palu 63.5 kg dari ketinggian 76 cm yang dibutuhkan untuk menumbuk *split spoon* sejauh 30 cm.

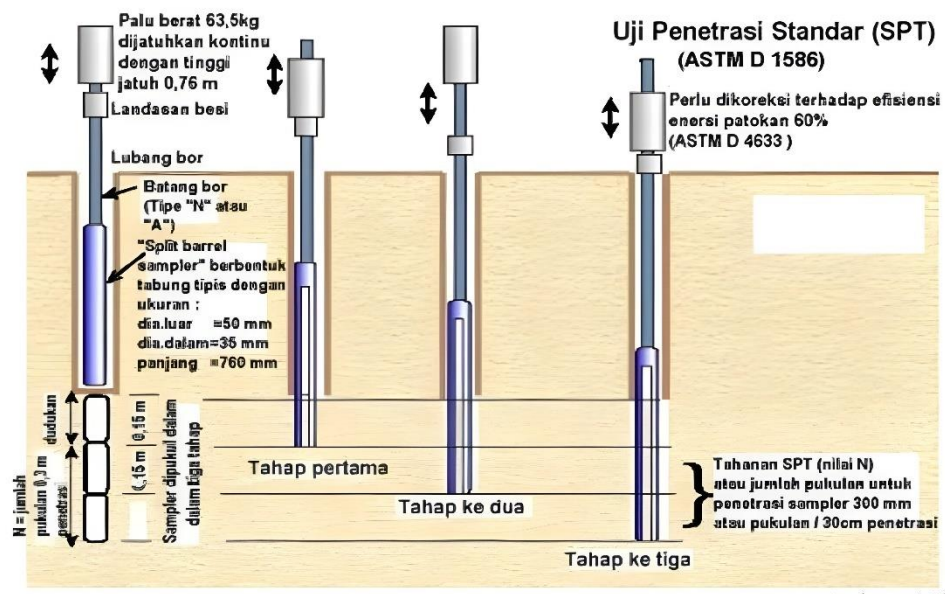
Dalam (SNI 4153, 2008) *Standard Penetration Test (SPT)* yaitu suatu metode uji yang dilaksanakan bersamaan dengan pengeboran untuk mengetahui, baik perlawanan dinamik tanah maupun pengambilan contoh terganggu dengan teknik penumbukan.

Menurut (SNI 4153, 2008) pengujian *SPT* terdiri dari:

- a) uji pemukulan tabung belah dinding tebal ke dalam tanah, disertai pengukuran jumlah pukulan untuk memasukkan tabung belah sedalam 300 mm vertikal.
- b) Dalam sistem beban jatuh ini digunakan palu dengan berat 63,5 kg, yang dijatuhkan secara berulang dengan tinggi jatuh 0,76 m.

- c) Pelaksanaan pengujian dibagi dalam tiga tahap, yaitu berturut-turut setebal 150 mm untuk masing-masing tahap.
- d) Tahap pertama dicatat sebagai dudukan, sementara jumlah pukulan untuk memasukkan tahap kedua dan ketiga dijumlahkan untuk memperoleh nilai pukulan N atau perlawanan *SPT* (dinyatakan dalam pukulan/0,3 m).

Berikut merupakan gambaran pengujian *Standard Penetration Test (SPT)* ditunjukkan pada Gambar 2.1:



Gambar 2.1 *Standard Penetration Test (SPT)*

(Sumber : SNI 4153, 2008)

Hasil dari pengetesan *SPT* bisa menentukan *consistency* dan *relative density* dari nilai *standart penetrasi test (N-SPT)* kita bisa memakai tabel dari buku (Warman, 2019) yang akan di tampilkan pada Tabel 2.3 dan Tabel 2.4 .

Tabel 2.3 Penentuan *Consistency* untuk *clay*

N-SPT	<i>Consistensi</i>
<2	<i>Very soft</i>
2-4	<i>Soft</i>
4-8	<i>Medium</i>
8-15	<i>Stiff</i>

N-SPT	<i>Consistensi</i>
15-30	<i>Very stiff</i>
>30	<i>Hard</i>

(Sumber : Warman, 2019)

Tabel 2.4 Penentuan *Relative Density* untuk *Sand*

N-SPT	<i>Relative Density (Dr)</i>
0-4	<i>Very loose</i>
4-10	<i>Loose</i>
10-30	<i>Medium dense</i>
30-50	<i>Dense</i>
>50	<i>Very dense</i>

(Sumber : Warman, 2019)

2.1.4 Parameter Tanah (Korelasi Empirik)

Dalam praktik geoteknik, pendekatan empiris memegang peran penting. Metode ini tidak hanya memberikan estimasi awal, tetapi juga memungkinkan validasi data antara hasil laboratorium dan investigasi lapangan. Banyak persamaan dan grafik empiris yang telah dikembangkan berdasarkan pengalaman lapangan, data historis, dan pertimbangan teknis. (Ameratunga et al., 2016)

Mengingat tingginya biaya pengujian geoteknik baik lapangan maupun laboratorium dan keterbatasan data seperti jumlah titik bor SPT atau sampel uji, korelasi empiris menjadi solusi praktis untuk memaksimalkan informasi yang tersedia. (Ameratunga et al., 2016)

2.1.4.1 Berat Volume Tanah

Berat volume tanah adalah berat total tanah dalam satuan volume tertentu yang terdiri dari berat butiran tanah dan kandungan air pori di dalamnya. Berat volume tanah juga berperan dalam perhitungan tekanan *overburden* atau tekanan vertikal total pada suatu kedalaman tertentu (Ameratunga et al., 2016). Nilai tipikal untuk berat volume curah dan berat volume jenuh terdapat pada Tabel 2.5

Tabel 2.5 Nilai Tipikal untuk Berat Volume Normal dan Berat Volume Jenuh

Jenis Tanah		Bulk unit weight (kN/ m ³)		Saturated unit weight (kN/ m ³)	
		Loose	Dense	Loose	Dense
Granular Soils	Gravel	16	18	20	21
	Well graded sand and gravel	19	21	21.5	23
	Coarse or medium sand	16,5	18,5	20	21,5
	Well graded sand	18	21	20,5	22,5
	Fine or silty sand	17	19	20	21,5
	Rock fill	15	17,5	19,5	21
	Brick hardcore	13	17,5	16,5	19
	Slag fill	12	15	18	20
	Ash fill	6,5	10	13	15
Cohesive soils	Peat (high variability)	12		12	
	Organic clay	15		15	
	Soft clay	17		17	
	Firm clay	18		18	
	Stiff clay	19		19	
	Hard clay	20		20	
	Stiff or hard glacial clay	21		21	

(Sumber : Ameratunga et al., 2016)

Berat volume jenuh (γ_{sat}) menunjukkan kondisi tanah yang terletak di bawah muka air tanah dengan tingkat kejenuhan mencapai 100%. Hubungan antara parameter dasar karakterisasi tanah ini memungkinkan dilakukannya estimasi nilai γ_{sat} , antara lain melalui persamaan (2.1) berikut : (Braja M, 2019)

$$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{1 + e} \quad (2.1)$$

Dimana:

G_s = Specific Gravity

E = angka pori Void Ratio

γ_w = Berat volume air (10kN/m²)

Nilai berat satuan jenuh digunakan ketika tanah berada di bawah muka air tanah. Kemudian untuk Berat volume efektif didapatkan dari persamaan (2.2) berat volume tersaturasi – berat volume air.(G.Look, 2019)

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (2.2)$$

Dimana:

γ' = Berat volume efektif

γ_{sat} = Berat volume jenuh

γ_w = Berat volume air (9,81kN/m³)

Selain berat volume jenuh (γ_{sat}) dan berat volume efektif (γ'), parameter berat volume kering (γ_s) juga diperlukan dalam analisis geoteknik. Apabila data hasil pengujian laboratorium tidak tersedia, nilai γ_s dapat diperkirakan melalui korelasi empiris. (G.Look, 2019) dalam *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables* menyajikan nilai-nilai tipikal untuk berat volume kering dan jenuh berbagai jenis tanah, seperti tercantum dalam Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Nilai Representatif Berat Volume Tanah Kering dan Jenuh

<i>Type</i>	<i>Soil Description</i>	<i>Unit weight range (kN/m³)</i>	
		<i>Dry</i>	<i>Saturated</i>
<i>Cohesionless</i>	<i>Soft sedimentary (chalk, shale, siltstone, coal)</i>	12	18
<i>Compacted Broken Rock</i>	<i>Hard sedimentary (Conglomerate, sandstone)</i>	14	19
	<i>Metamorphic</i>	18	20
	<i>Igneous</i>	17	21
<i>Cohesionless</i>	<i>Very loose</i>	14	17
	<i>Loose</i>	15	18
<i>Sand and gravels</i>	<i>Medium dense</i>	17	20
	<i>Dense</i>	19	21

<i>Type</i>	<i>Soil Description</i>	<i>Unit weight range (kN/m³)</i>	
		<i>Dry</i>	<i>Saturated</i>
	<i>Very dense</i>	21	22
<i>Cohesionless</i>	<i>Loose</i>		
	<i>Uniformly graded</i>	14	17
	<i>Well graded</i>	16	19
	<i>Dense</i>		
	<i>Uniformly graded</i>	18	20
	<i>Well graded</i>	19	21
<i>Cohesive</i>	<i>Soft-organic</i>	8	14
	<i>Soft-non organic</i>	12	16
	<i>Stiff</i>	16	18
	<i>Hard</i>	18	20

(Sumber : G.Look, 2019)

2.1.4.2 Kohesi (Cu)

Kohesi tak terdrainase (Cu) adalah kekuatan geser tanah yang dominan pada tanah lempung jenuh dalam kondisi cepat atau tanpa aliran air (undrained). Dalam kondisi seperti ini, sudut geser dalam sering dianggap nol, sehingga kekuatan tanah hanya berasal dari kohesi (Ameratunga et al., 2016). Nilai Cu bisa di dapat dari niali N-SPT seperti yang tertera pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Perkiraan Variasi Konsistensi, N, dan Cu Tanah Lempung

<i>Consistensi</i>	<i>N</i>	<i>Cu (kN/m²)</i>
<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>Hard</i>	>30	>200

(Sumber : Ameratunga et al., 2016)

2.1.4.3 Sudut Geser (ϕ)

Sudut geser dalam (ϕ) mencerminkan besar gaya gesekan antara butir-butir tanah. Nilai ini sangat penting pada tanah non-kohefif seperti pasir, yang kekuatannya tidak tergantung pada kohesi. Sudut geser dalam berperan besar dalam menentukan daya dukung ultimit fondasi, tekanan tanah lateral, dan gaya tahan tanah terhadap beban horizontal (G.Look, 2019). Nilai sudut geser bisa di dapat dari nilai N-SPT seperti pada tabel Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Nilai Tipikal Dr dan ϕ dari N-SPT

<i>Description</i>	<i>Relative density</i>	<i>SPT-N (blows/300mm)</i>		<i>Strength</i>
		<i>Uncorrected field value</i>	<i>Corrected value</i>	<i>Friction angle</i>
<i>Very Loose</i>	<15%	$N \leq 4$	$(N_o)_{60} < 3$	$\phi < 28^\circ$
<i>Loose</i>	15-35%	$N = 4-10$	$(N_o)_{60} = 3-8$	$\phi = 28-30^\circ$
<i>Medium Dense</i>	35-65%	$N = 10-30$	$(N_o)_{60} = 8-25$	$\phi = 30-40^\circ$
<i>Dense</i>	65-85%	$N = 30-50$	$(N_o)_{60} = 25-42$	$\phi = 40-45^\circ$
<i>Very Dense</i>	>85%	$N > 50$	$(N_o)_{60} > 42$	$\phi = 45-50^\circ$
	100%		$(N_o)_{60} = 60$	$\phi = 50^\circ$

(Sumber : G.Look, 2019)

2.1.4.4 Kohesi Efektif (C') dan Sudut Geser Efektif (ϕ')

Parameter efektif dalam tanah adalah di mana parameter tanah tersebut tidak terpengaruh oleh sifat yang lainnya hanya sifat asli tanahnya yang bekerja, di mana (G.Look, 2019) menjelaskannya sebagai kekuatan asli tanah pada kondisi tegangan efektif. Sementara itu, sudut geser efektif mencerminkan resistansi geser akibat friksi dan saling mengunci antar partikel, menurut (Ameratunga et al., 2016) sangat dipengaruhi oleh karakteristik material butiran tanah. Kedua parameter ini bekerja secara simultan dengan proporsi berbeda tergantung jenis tanah; tanah kohefif lebih dominan dipengaruhi oleh kohesi efektif, sedangkan tanah granular lebih bergantung pada sudut geser efektif. Nilai dari kekuatan tanah efektif pada kedua sumber tersebut terdapat pada Tabel 2.9, Tabel 2.10, dan Tabel 2.11.

Tabel 2.9 Nilai Tipikal Parameter Kohesi Efektif dan Sudut Geser Efektif

<i>N</i>	<i>Typical soils in group</i>	<i>Soil parameters</i>	
		<i>C'</i> (kPa)	<i>φ'</i> (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 sand 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

(Sumber : Ameratunga et al., 2016)

Tabel 2.10 Nilai Tipikal Parameter Kuat Geser Efektif pada Tanah Kohesif

<i>Type</i>	<i>Soil description</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

(Sumber : G.Look, 2019)

Tabel 2.11 Nilai Tipikal Sudut Geser Efektif (ϕ') pada Tanah Granular

<i>Type</i>	<i>Description/state</i>	<i>Friction angle(degrees)</i>
	<i>Soft sedimentary (chalk, shale, siltstone, coal)</i>	30 – 40

<i>Type</i>	<i>Description/state</i>	<i>Friction angle(degrees)</i>
<i>Cohesionless Compacted Broken rock</i>	<i>Hard sedimentary (conglomerate, sandstone)</i>	35 – 45
	<i>Metamorphic</i>	35 – 45
	<i>Igneous</i>	40 – 50
<i>Cohesionless Gravels</i>	<i>Very loose/loose</i>	30 – 34
	<i>Medium dense</i>	34 – 39
	<i>Dense</i>	39 – 44
	<i>Very dense</i>	44 – 49
<i>Cohesionless Sands</i>	<i>Very loose/loose</i>	27 – 32
	<i>Medium dense</i>	32 – 37
	<i>Dense</i>	37 – 42
	<i>Very dense</i>	42 – 47
<i>Cohesionless Sands</i>	<i>Loose</i>	
	<i>Uniformly graded</i>	27 – 30
	<i>Well graded</i>	30 – 32
	<i>Dense</i>	
	<i>Uniformly graded</i>	37 – 40
	<i>Well graded</i>	40 – 42

(Sumber : G.Look, 2019)

2.1.4.5 Modulus Elastisitas Tanah

Modulus elastisitas tanah (E) merupakan indikator kekakuan tanah dalam menahan deformasi elastis ketika menerima beban, nilai E dipengaruhi oleh komposisi tanah, kepadatan, dan kondisi pembebanan (G.Look, 2019). Modulus elastisitas dapat di tentukan dengan uji triaxial dan bisa juga dengan metode korelasi empiris melalui nilai dari uji SPT. Berikut Tabel 2.12 merupakan korelasi modulus elastisitas.

Tabel 2.12 Parameter Elastisitas dari Berbagai Jenis Tanah.

<i>Type</i>	<i>Stren'gth of soil</i>	<i>Elaastic modulus, E (MPa)</i>	
		<i>Short term</i>	<i>Long term</i>
<i>Gravel</i>	<i>Loose</i>	25-50	
	<i>Medium</i>	50-100	
	<i>Dense</i>	100-200	
<i>Medium to coarse sand</i>	<i>Very loose</i>	<5	
	<i>Loose</i>	3-10	
	<i>Medium dense</i>	8-30	
	<i>Dense</i>	25-50	
	<i>Very dense</i>	40-100	
<i>Fine sand</i>	<i>Loose</i>	5-10	
	<i>Medium</i>	10-25	
	<i>Dense</i>	25-50	
<i>Silt</i>	<i>Soft</i>	<10	<8
	<i>Stiff</i>	19-20	8-15
	<i>Hard</i>	>20	>15
<i>Clay</i>	<i>Very soft</i>	<3	<2
	<i>Soft</i>	2-7	1-5
	<i>Firm</i>	5-12	4-8
	<i>Stiff</i>	20-25	7-20
	<i>Very stiff</i>	20-50	15-35
	<i>Hard</i>	40-80	30-60

(Sumber : G.Look, 2019)

2.1.4.6 Poisson Ratio (ν)

(Ameratunga et al., 2016) mendefinisikan Poisson Ratio sebagai rasio numerik yang menyatakan hubungan antara deformasi lateral dan deformasi aksial suatu material ketika menerima beban tarik atau tekan searah. Nilai-nilai tipikal Poisson ratio dari berbagai jenis tanah ditunjukkan pada Tabel 2.13.

Tabel 2.13 Nilai Tipikal dari *Poisson Ratio*

<i>Material</i>	<i>Poisson's ratio</i>
<i>Saturated clay (undrained)</i>	0,5
<i>Saturated clay (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 - 0,3
<i>Ice</i>	0,36
<i>Alumunium</i>	0,35
<i>Steel</i>	0,29
<i>Concrete</i>	0,15

(Sumber : Ameratunga et al., 2016)

2.2 Fondasi

2.2.1 Definisi Fondasi

Fondasi adalah struktur bawah tanah yang bekerja untuk mendistribusikan beban bangunan ke tanah dengan merata, sehingga dapat meminimalkan risiko penurunan diferensial dan menjaga kestabilan bangunan. pemilihan jenis fondasi sangat bergantung pada kedalaman tanah keras serta besar beban yang harus ditahan. Dengan demikian, baik kondisi tanah maupun jenis bangunan menjadi pertimbangan utama dalam perencanaan fondasi yang tepat (Braja M, 2019).

Menurut Hary Christady dalam bukunya Analisis dan Perencanaan Fondasi 1, fondasi tidak hanya berfungsi sebagai penyalur beban, tetapi juga sebagai elemen yang harus menyesuaikan diri dengan kondisi tanah di lapangan. Ia menekankan pentingnya pemahaman terhadap karakteristik tanah seperti kepadatan, konsistensi, dan daya dukung tanah sebelum merancang fondasi. Pendekatan ini memastikan bahwa fondasi yang dibangun mampu berfungsi optimal sesuai dengan beban struktur dan kondisi geoteknik setempat .(Hardiyatmo, 2020)

2.2.2 Klasifikasi Fondasi

Fondasi seperti kaki sebuah bangunan yang punya peran vital. Bagian paling dasar ini berfungsi sebagai penopang seluruh beban dari struktur di atasnya, lalu mendistribusikan beban tersebut ke tanah. Secara umum fondasi terbagi menjadi dua jenis yaitu:

a. Fondasi dangkal

Fondasi dangkal juga disebut sebagai fondasi langsung yang mempunyai arti fondasi tersebut mendukung beban secara langsung, yaitu fondasi yang digunakan pada kedalaman tanah yang relatif dangkal, kedalaman tanah pendukung fondasi kebanyakan dekat dengan permukaan tanah atau kurang dari 10 meter dari permukaan tanah dan lapisan tanah pada dasar fondasi harus mampu mendukung beban yang disalurkan pada tanah tersebut. Fondasi dangkal umumnya digunakan pada bangunan-bangunan kecil yang struktur dukungnya kecil dan tidak terlalu tinggi seperti rumah. Fondasi dangkal mempunyai beberapa macam jenis yaitu;

(1) Fondasi telapak

Fondasi telapak merupakan fondasi beton bertulang di mana tulangan tersebut seperti piramid tanpa ujung. Fondasi ini berdiri tunggal untuk tumpuan struktur kolom bangunan yang memiliki fungsi meneruskan beban ke tanah keras di bawah fondasi tersebut.

(2) Fondasi memanjang

Fondasi yang digunakan untuk mendukung beban memanjang seperti beban dinding dan beban beberapa kolom yang saling berdekatan yang mempunyai tumpuan beban tidak terlalu berat atau bukan menjadi kolom utama.

(3) Fondasi rakit

Fondasi berbentuk pelat yang terbuat dari beton, dan rangkaian tulangan yang dibentangkan luas keseluruhan bagian dasar bangunan. digunakan bila susunan kolom-kolom jaraknya saling berdekatan yang tidak memungkinkan menggunakan fondasi telapak.

b. Fondasi dalam

Fondasi dalam adalah fondasi yang meneruskan beban bangunan di atasnya ke tanah keras atau batuan yang terletak jauh dari permukaan tanah atau pada kedalaman lebih dari 10 meter, seperti :

(1) Fondasi sumuran (*pier foundation*)

Fondasi sumuran (*pier foundation*) merupakan fondasi peralihan antara fondasi dangkal dan fondasi tiang, digunakan bila tanah dasar yang keras atau kuat terletak pada kedalaman yang cukup dalam. menggunakan komponen batu pecah dan beton bertulang untuk mengisinya, pengecorannya juga dilakukan di tempat.

(2) Fondasi tiang (*pile foundation*)

Fondasi tiang (*pile Foundation*) merupakan fondasi yang salah satu konstruksinya terbuat dari tiang pancang yang di tancapkan ke dalam tanah untuk menerima dan mentransfer beban dari struktur atas ke tanah keras. Digunakan bila tanah yang akan dibangun fondasi tiang pada kedalaman dangkal atau kurang dari 10 meter mampu mendukung bebannya dan tanah kerasnya terletak pada kedalaman yang sangat dalam atau lebih dari 10 meter. Tiang yang digunakan sebagai konstruksi ada tiga macam yaitu tiang dari beton, tiang dari baja, dan tiang dari kayu. Fondasi tiang umumnya berdiameter lebih kecil dan lebih panjang dibanding dengan fondasi sumuran.

(3) Fondasi Bor Pile (*bore pile foundation*)

Fondasi Bor Pile (*bore pile foundation*) merupakan jenis fondasi yang berbentuk tabung yang berfungsi meneruskan beban di atasnya ke lapisan tanah keras yang mempunyai daya dukung tanah yang diperlukan untuk mendukung beban di atasnya yang telah direncanakan, dengan cara melakukan pengeboran tanah, lalu merakit tulangan, dan setelah selesai dilakukan pengecoran pada galian tersebut.

2.2.3 Fondasi Tiang Pancang Pipa Baja

Tiang pancang pipa baja sangat cocok digunakan dalam lingkungan yang mengandung air atau kondisi korosif, dengan syarat adanya pelapisan pelindung atau perlakuan anti-korosi. Saat digunakan di lingkungan laut, bagian pipa biasanya dilindungi dengan lapisan khusus atau dicor beton di bagian dalamnya untuk meningkatkan ketahanan terhadap gaya-gaya luar (Braja M & Khaled, 2014).

Untuk tiang pancang pipa baja memiliki dua jenis konfigurasi ujung yaitu ujung tiang dengan kondisi *open-ended pipe piles* dan ujung tiang dengan kondisi *closed-ended pipe piles*.

perbedaan ujung tiang pipa baja mempengaruhi kinerjanya secara signifikan. Tiang *closed-ended* dengan pelat ujung berperilaku seperti tiang padat, mengandalkan daya dukung ujung dan gesekan kulit luar. Sedangkan *open-ended* memungkinkan tanah masuk, membentuk *soil plug* yang mempengaruhi daya dukungnya (Tomlinson & Woodward, 2007)

Tomlinson menemukan *open-ended* lebih efisien di tanah pasir, mengurangi 30-40% tahanan pemancangan. Namun di tanah lempung justru bisa bermasalah karena *plugging*. Das mencatat *closed-ended* lebih stabil untuk beban vertikal di tanah kohesif, tapi membutuhkan energi pemancangan lebih besar.

2.3 Daya Dukung Fondasi Tiang Pancang

Daya dukun fondasi tiang adalah kemampuan suatu fondasi tiang untuk menahan suatu beban di atasnya, baik beban aksial maupun beban lateral. Menurut (Braja M, 2019) yang menyatakan bahwa kapasitas aksial ditentukan oleh tahanan ujung dan tahanan sepanjang sisi tiang, sedangkan kapasitas lateral ditentukan oleh interaksi tanah dan tiang yang sering dimodelkan sebagai balok pada fondasi elastis (*beam on elastic foundation*).

2.4 Daya Dukung Lateral Fondasi

Dalam menganalisis gaya lateral yang bekerja pada tiang pancang, perlu diperhatikan model ikatan antara tiang dengan pelat kepala (*pile cap*), karena hal

tersebut sangat mempengaruhi respon struktural tiang terhadap gaya horizontal. McNukty (1956) dalam buku (Hardiyatmo, 2023) membedakan tiang pancang menjadi dua tipe berdasarkan model ujung atasnya, yaitu:

1. Tiang ujung jepit (*fixed-end pile*)
2. Tiang ujung bebas (*free-end pile*)

Tiang ujung jepit adalah tiang yang bagian atasnya tertanam dalam pelat kepala tiang atau elemen superstruktur lainnya sedalam paling sedikit 60cm, sehingga memiliki kekakuan tumpuan yang tinggi. Sebaliknya, tiang ujung bebas adalah tiang yang hanya tertanam kurang dari 60cm atau tidak terjepit sama sekali dalam pelat penutup kepala tiang, sehingga lebih fleksibel dan cenderung mengalami rotasi bebas di bagian atasnya. Pemilihan model ikatan ini akan sangat mempengaruhi bentuk lengkung lendutan dan kapasitas dukung lateral tiang tersebut.

Sebelum dilakukan perhitungan kapasitas lateral tiang tunggal, perlu ditentukan terlebih dahulu jenis perilaku struktur tiangnya, apakah bertindak sebagai tiang pendek (*rigid pile*) atau tiang panjang (*elastic pile*). Penentuan ini didasarkan pada nilai parameter kekakuan lateral tiang dan tanah.

Menurut Hardiyatmo (2023), fondasi tiang yang menerima beban lateral harus memenuhi dua kriteria utama, yaitu:

1. Faktor keamanan terhadap keruntuhan ultimit harus terpenuhi untuk memberikan jaminan tambahan terhadap risiko kegagalan struktur akibat melebihi kapasitas dukung tanah atau beban yang bekerja.
2. Defleksi yang terjadi akibat pembebanan harus berada dalam batas toleransi yang diizinkan.

Fondasi tiang yang menahan beban lateral tidak boleh mengalami defleksi yang berlebihan. Berdasarkan SNI 8467:2017 Subbab 9.7.3.1, kapasitas lateral tiang ditentukan berdasarkan besar deformasi lateral yang diizinkan pada kepala tiang. Batas deformasi lateral yang diperbolehkan adalah 12 mm untuk gempa rencana dan 25 mm untuk gempa kuat, dengan kondisi tiang tunggal dan *free-head*.

2.4.1 Metode Broms

Metode Broms merupakan metode analitik yang dikembangkan oleh Bengt B. Broms untuk menentukan kapasitas daya dukung lateral tiang pancang pada berbagai kondisi tanah. Menurut *Federal Highway Administration* (FHWA) dalam *Geotechnical Engineering Circular* No. 5, Volume I, metode ini memberikan pendekatan yang sederhana dan konservatif untuk menghitung beban lateral ultimit yang dapat didukung oleh tiang pancang, baik dalam tanah kohesif maupun granular.

Pada kondisi tanah granular seperti pasir, tekanan tanah pasif maksimum memainkan peran penting dalam menahan gaya lateral yang bekerja pada tiang. Tiang yang tertanam dalam tanah pasir dianggap cukup panjang (*long pile*). Metode Broms mempertimbangkan kondisi kegagalan akibat kapasitas lentur tiang tercapai, atau karena tanah mencapai tekanan pasif maksimum sepanjang kedalaman penetrasi. Dalam metode ini, profil tanah diasumsikan homogen dan kaku sempurna.

Kelebihan metode Broms adalah kesederhanaannya dan kemampuannya memberikan pendekatan batas (*limit state*) dalam perencanaan awal, walaupun dalam kondisi kompleks metode ini perlu dilengkapi dengan pendekatan lain seperti kurva p - y .

Sebelum melakukan analisis dengan metode Broms, jenis tanah harus ditentukan terlebih dahulu berdasarkan klasifikasi umum (FHWA NHI-05-042, 2006), yaitu apakah termasuk tanah kohesif atau non-kohesif. Penentuan ini difokuskan pada kedalaman kritis, yaitu sekitar 4 hingga 5 kali diameter tiang dari permukaan tanah. Untuk tanah yang tergolong non-kohesif (tanpa kohesi), diperlukan penentuan nilai koefisien reaksi lateral tanah (K_h), yang dapat diperoleh melalui referensi.

Tabel 2.14 Nilai K_h Untuk Tanah Tanpa Kohesi

<i>Soil Density</i>	<i>K_h, in kN/m^3 (lbs/in^3)</i>	
	<i>Above Ground Water</i>	<i>Below Ground Water</i>
<i>Loose</i>	1900(7)	1086(4)
<i>Medium</i>	8143(30)	5429(20)
<i>Dense</i>	17644(65)	10857(40)

(Sumber : FHWA NHI-05-042, 2006)

Untuk tanah kohesif penentuan nilai koefisien reaksi lateral tanah (K_h), dapat diperoleh dari:

$$K_h = \frac{n_1 n_2 80 q_u}{b} \quad (2.3)$$

Dimana:

q_u = Kuat tekan tak terkekang dalam kPa

b = Lebar atau diameter tiang dalam meter

n_1 dan n_2 = Koefisien empiris diambil dari Tabel 2.15 Nilai n_1 dan n_2 untuk Mencari K_h di Tanah Kohesi

Tabel 2.15 Nilai n_1 dan n_2 untuk Mencari K_h di Tanah Kohesi

<i>VALUES OF COEFFICIENTS n_1 AND n_2 FOR COHESIVE SOILS</i>	
<i>Unconfined Compressive Strength, q_u, in kPa (lbs/ft^2)</i>	n_1
<i>Less than 48 kPa (1000 lbs/ft^2)</i>	0,32
<i>48 to 191 kPa (1000 to 4000 lbs/ft^2)</i>	0,36
<i>More than 191 kPa (4000 lbs/ft^2)</i>	0,40
<i>Pile Material</i>	n_2
<i>Steel</i>	1,00
<i>Concrete</i>	1,15
<i>Wood</i>	1,30

(Sumber : FHWA NHI-05-042, 2006)

2.4.1.1 Tiang Dalam Tanah Tanpa Kohesif

Menurut Broms dalam FHWA, untuk mengetahui nilai dari defleksi tiang tunggal maka tanah pada area tiang harus diketahui apakah berjenis lempung atau

pasir, jika tanah pada area tiang sudah diketahui berjenis pasir maka bisa menggunakan langkah - langkah berikut.

2.4.1.2 Defleksi Tiang Pada Tanah Tanpa Kohesif

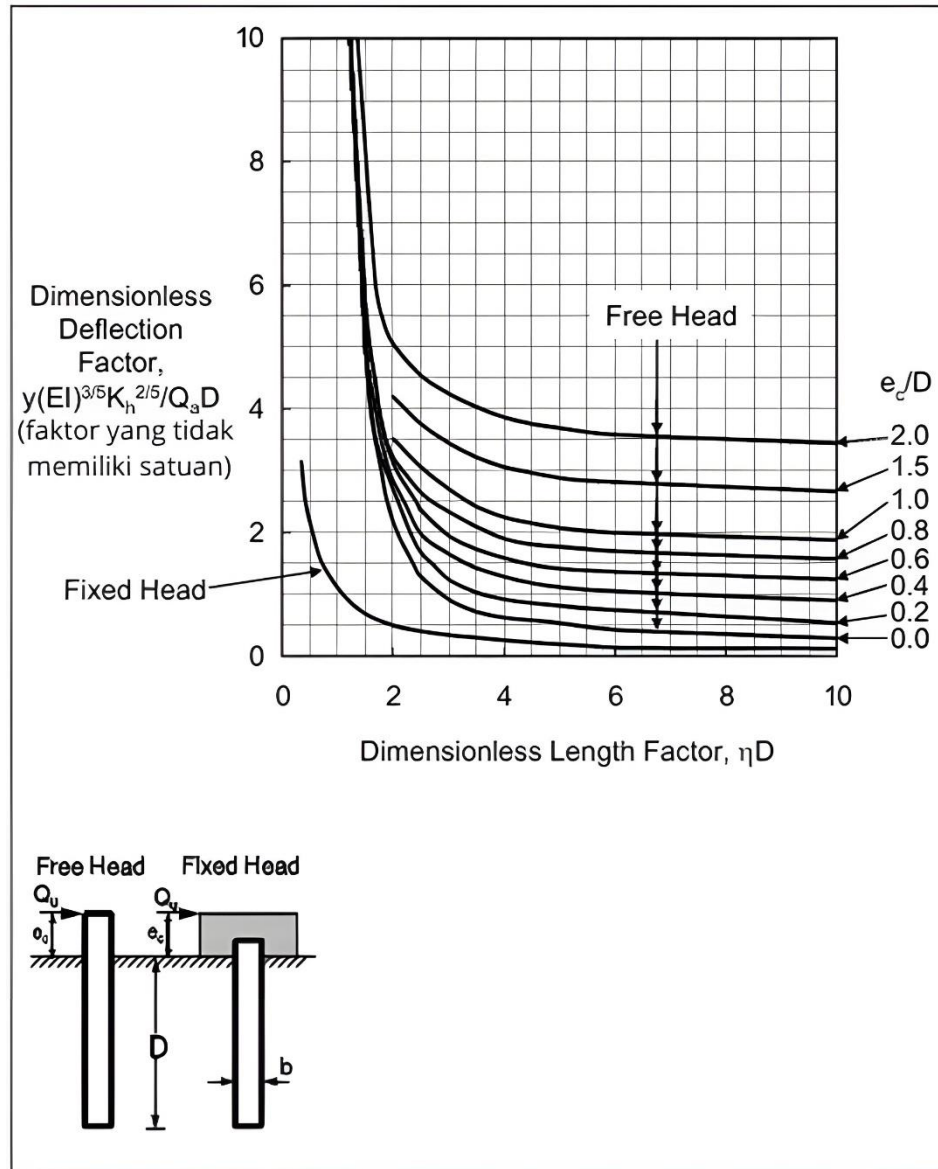
Penentuan analisis defleksi untuk tiang pancang di media tanah pasir (non-kohesif), baik dengan kondisi kepala bebas maupun terkekang. Harus mencari dahulu untuk jenis tiang tersebut apakah tiang panjang atau tuang pendek dengan faktor tak berdimensi (η):

1. Menentukan parameter tiang pancang
2. Menentukan nilai panjang kritis (η) untuk tanah non-kohesif

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{K_h}{EI}} \quad (2.4)$$

3. Menentukan faktor panjang tak berdimensi, pada tanah tanpa kohesi digunakan ηD .
4. Menentukan jenis tiang, tiang panjang atau pendek. Pada tanah non kohesif berikut merupakan ketentuannya :
 - a. $\eta D > 4$ (tiang panjang)
 - b. $\eta D < 2$ (tiang pendek)
 - c. $2 < \eta D < 4$ (tiang menengah)
5. Jika sudah mendapatkan jenis tiang maka selanjutnya mencari DDF (*dimensionless deflection factor*) atau faktor yang tidak memiliki satuan dengan menggunakan grafik DDF vs ηD .

Dalam metode ini, parameter tak berdimensi ηD menjadi variabel penting yang diplot pada grafik. Untuk menentukan nilai defleksi, untuk grafik penentuan defleksi tiang pada tanah non-kohesif ditampilkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Grafik Defleksi Lateral pada Permukaan Tanah Tiang Pada Tanah Tanpa Kohesif

Setelah DDF (*dimensionless deflection factor*) di temukan maka bisa mencari defleksi dengan rumus turunan dari rumus yang ada dalam grafik Gambar 2.2 di atas:

$$y_0 = \frac{DDF Q_a D}{(EI)^{\frac{3}{5}} K_h^{\frac{2}{5}}} \quad (2.5)$$

Keterangan:

DDF = *dimensionless deflection factor* (di dapat pada grafik)

Q_a	=	beban yang bekerja (kN)
D	=	panjang tiang tertanam (m)
E	=	modulus elastisitas tiang pancang (kN/m ²)
I	=	inersia tiang pancang (m ⁴)
K_h	=	koefisien reaksi lateral tanah (kN/m ³)

2.4.1.3 Daya Dukung Tiang Metode Broms

Daya dukung dari metode Broms jika defleksi dari tiang tunggal yang akan di analisis sudah diketahui defleksinya maka rumus yang di pakai untuk mengetahui daya dukung bisa menggunakan rumus penurunan dari defleksi. Dimana masih memakai grafik Gambar 2.2 untuk mencari DDF, dan tetap mencari dari jenis tiang panjang atau pendek, dan jenis tanah di sekitar tiang.

$$Q_a = \frac{y_0 (EI)^{\frac{3}{5}} K_h^{\frac{2}{5}}}{DDF \times D} \quad (2.6)$$

Keterangan:

DDF	=	<i>dimensionless deflection factor</i> (di dapat pada grafik)
y_0	=	defleksi pada kepala tiang (m)
D	=	panjang tiang tertanam (m)
E	=	modulus elastisitas tiang pancang (kN/m ²)
I	=	inersia tiang pancang (m ⁴)
K_h	=	koefisien reaksi lateral tanah (kN/m ³)

2.4.2 Metode Meyerhof

Analisis daya dukung lateral dan defleksi tiang pancang merupakan aspek kritis dalam perancangan fondasi, terutama untuk struktur yang menerima beban lateral signifikan seperti jembatan, dermaga, atau menara. (Meyerhof, 1987) melakukan penelitian komprehensif tentang respons tiang tunggal dan kelompok tiang fleksibel yang dibebani lateral pada tanah kohesif (*Clay*) dan non-kohesif (*Sand*). Penelitian ini menjadi landasan penting untuk memahami interaksi tanah-

tiang dan memprediksi kinerja fondasi tiang dalam berbagai kondisi tanah (Meyerhof, 1987).

(Meyerhof dalam Das, 2011) memberikan pendekatan analitis untuk menilai respons tiang pancang kaku dan fleksibel yang menerima beban lateral pada tanah kohesif. Menurut metode ini, sebuah tiang dikategorikan sebagai fleksibel jika nilai $K_r < 0,001$ apabila lebih besar maka dikategorikan menjadi tiang kaku, untuk penentuan nilai K_r bisa dilihat pada persamaan (2.7):

$$K_r = \frac{E_p I_p}{E_s D^4} \quad (2.7)$$

Keterangan:

E_p = modulus elastisitas tiang (kN/m²)

E_s = rata-rata modulus elastisitas tanah sedalam D (kN/m²)

I_p = Inersia tiang (m⁴)

D = panjang tiang (m)

Jika tiang termasuk ke tiang fleksibel atau panjang, maka panjang tiang yang di pakai adalah panjang tiang efektif yang di mana tiang tersebut menurut Meyerhof jika termasuk tiang fleksibel maka distribusi beban tidak sampai ke bagian bawah tiang. panjang tiang efektif (D_e) bisa di dapat dari nilai K_r yaitu:

$$1,65(K_r^{0,12})D \quad (2.8)$$

2.4.2.1 Defleksi Tiang Metode Meyerhof

Defleksi tiang merupakan perubahan posisi yang terjadi pada kepala tiang yang mengalami pembebanan lateral, dalam jurnal (Meyerhof, 1987) defleksi tiang pada tanah pasir dan lempung itu menggunakan rumus yang sama akan tetapi untuk faktor pengaruhnya yang berbeda untuk tanah pasir dan lempung.

Berikut merupakan persamaan untuk mencari nilai defleksi tiang menurut (Meyerhof, 1987):

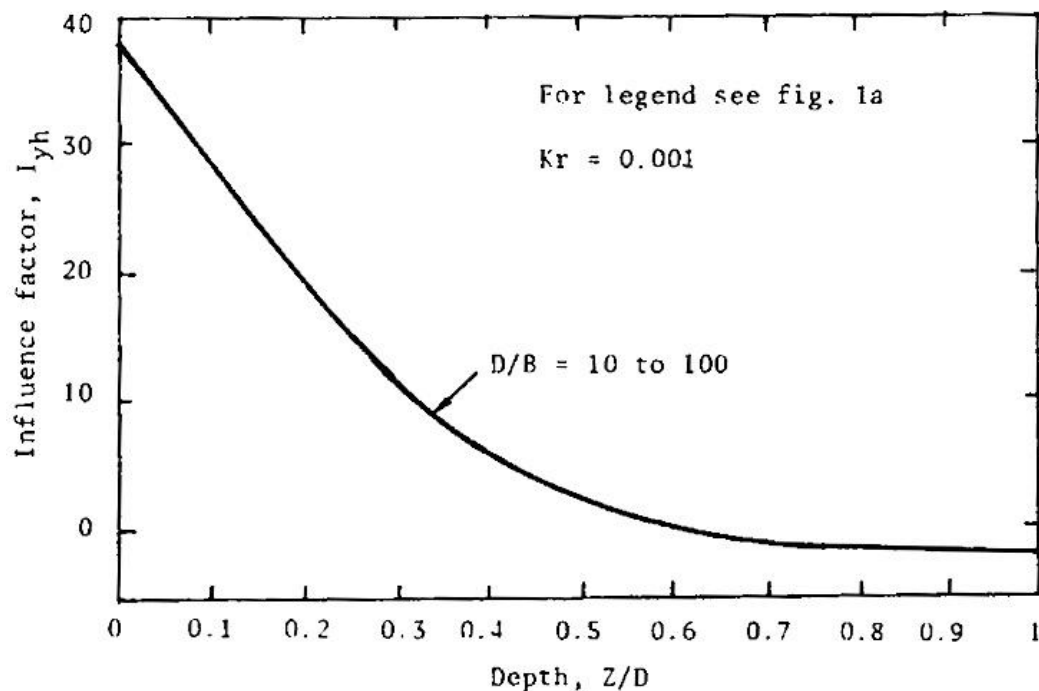
$$y_0 = \frac{I_y Q_a}{E_{su} D_e F_y} \quad (2.9)$$

Keterangan:

- Q_a = beban lateral (kN)
 E_{su} = rata-rata modulus elastisitas tanah sedalam D_e (kN/m²)
 D = kedalam tiang (m)
 D_e = Panjang efektif tiang (m)
 I_y = faktor pengaruh tak dimensi (tidak memiliki satuan) di dapat dari Gambar 2.3
 F_y = *yield displacement* faktor ($F_y=0,1 - 0,9$)

Untuk parameter F_y merupakan parameter perbandingan antara reaksi tanah dan tiang dalam teori elastik dan aktual, dalam jurnal Meyerhof menyebutkan nilai rasio berbanding lurus dengan kekakuan relatif, di mana jika kekakuan tiang semakin kecil maka perbandingan nilai aktual dan elastiknya semakin besar sehingga nilai rasionya semakin kecil, maka dapat disimpulkan jika tiang termasuk tiang kaku di mana $K_r > 0,001$ maka nilai $F_y = 0,6-1$ jika tiang termasuk tiang fleksibel di mana $K_r < 0,001$ maka nilai $F_y = 0,5-0,1$.

Dan untuk parameter I_y bisa di dapatkan dari Gambar 2.3 di bawah dengan grafik perbandingan antara I_y dengan D/D_e .



Gambar 2.3 Nilai Faktor Pengaruh I_y Untuk Tanah Pasir

2.4.2.2 Daya Dukung Tiang Metode Meyerhof

Daya dukung dengan metode Meyerhof bisa di cari dengan penurunan rumus defleksi di atas jika defleksi sudah diketahui, untuk rumusnya yaitu :

$$Q_a = \frac{E_{su} D_e F_y y_0}{I_y} \quad (2.10)$$

Keterangan:

- y_0 = defleksi kepala tiang (m)
- E_{su} = rata-rata modulus elastisitas tanah sedalam D_e (kN/m²)
- D = kedalaman tiang (m)
- D_e = Panjang efektif tiang (m)
- I_y = faktor pengaruh tak berdimensi dalam Gambar 2.3
- F_y = *yield displacement* faktor ($F_y=0,1 - 0,9$)

2.4.3 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga atau *Finite Element Method* (FEM) merupakan metode numerik yang sangat penting dalam rekayasa geoteknik karena mampu menganalisis perilaku tanah dan struktur secara terintegrasi. Prinsip dasar Metode Elemen Hingga adalah membagi domain analisis seperti tanah dan tiang menjadi elemen-elemen kecil dan memodelkan interaksi antar elemen melalui fungsi bentuk dan hukum keseimbangan. Dalam konteks geoteknik, Metode Elemen Hingga digunakan untuk simulasi tegangan, deformasi, dan rembesan tanah. Elemen yang digunakan dapat berupa segitiga, balok atau elemen isoparametrik tergantung kompleksitas geometri dan masalah yang dianalisis.

Metode Elemen Hingga dalam bidang geoteknik untuk memodelkan:

- Stabilitas lereng
- Daya dukung fondasi
- Interaksi tanah-struktur (*soil-structure interaction*)
- Konsolidasi dan rembesan air

Rumus dasar metode elemen hingga menggunakan persamaan keseimbangan global (*stiffness equation*):

$$[K] \times \{u\} = \{f\} \quad (2.11)$$

Dimana:

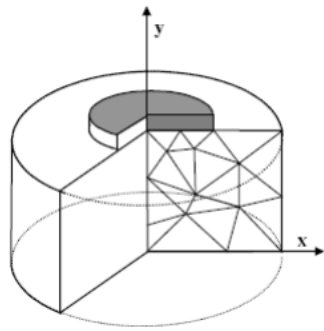
K = matriks kekakuan global

u = vektor perpindahan nodal

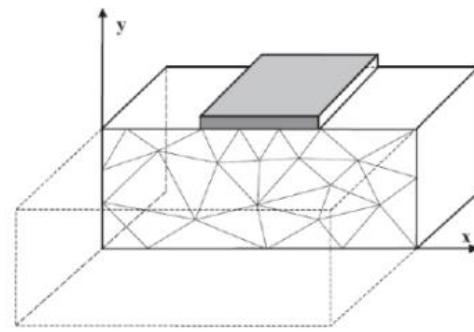
f = vektor gaya nodal eksternal

Untuk metode elemen hingga yang dipakai yaitu metode elemen hingga 2D. Metode Elemen Hingga 2D merupakan pendekatan numerik berbasis metode elemen hingga yang digunakan untuk menganalisis berbagai permasalahan geoteknik secara dua dimensi. Metode Elemen Hingga 2D bekerja dengan cara membagi domain tanah menjadi elemen-elemen kecil membentuk segitiga. Setiap elemen kemudian dianalisis berdasarkan properti tanah dan beban yang bekerja, sehingga memberikan gambaran rinci mengenai perilaku tegangan, regangan, dan deformasi pada media tanah. Dalam metode elemen hingga 2D ini hanya memiliki 2 arah perpindahan pada node atau *degree of freedom* yaitu arah horizontal dan vertikal sedangkan untuk 3D memiliki 3 arah perpindahan yaitu arah atas bawah, kiri kanan, dan arah depan belakang. Model konstitutif tanah seperti *Mohr-Coulomb*, *Hardening Soil*, dan *Soft Soil Creep* digunakan untuk merepresentasikan perilaku material dalam perhitungan Metode Elemen Hingga 2D.

Metode ini mampu melakukan analisis perhitungan untuk model *axisymmetric* maupun *plane-strain*. model *axisymmetric* dipakai untuk mengevaluasi struktur berbentuk lingkaran (*circular structures*) dengan penampang radial dan pembebanan yang merata terhadap pusat, di mana tegangan serta deformasi dianggap terjadi dalam arah radial. Sementara itu, model *plane-strain* digunakan untuk menganalisis struktur dengan penampang melintang yang mengalami pembebanan dan kondisi tegangan seragam, serta perpindahan atau deformasi pada arah tertentu dianggap tidak terjadi. Gambar dan Gambar memberikan ilustrasi dari kedua model tersebut (Gunnvard, 2016).



Gambar 2.4 Ilustrasi Model
axisymmetric



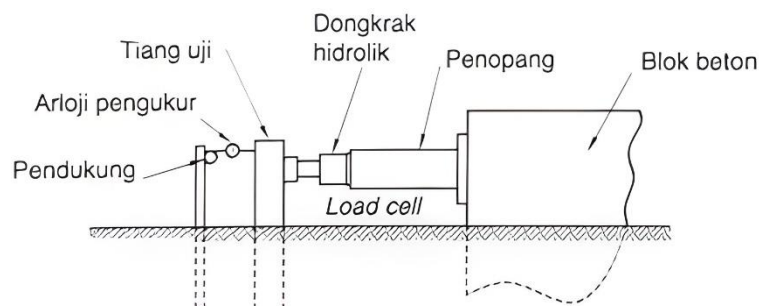
Gambar 2.5 Ilustrasi Model *Plane – Strain*

(Sumber : Gunnvard, 2016)

2.4.4 Uji Tiang

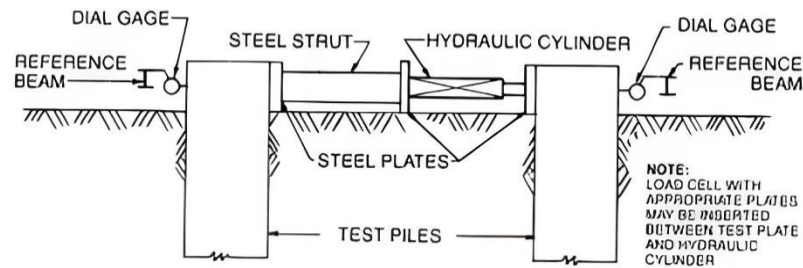
Lateral load test (uji pembebanan lateral) merupakan pengujian untuk mengevaluasi kemampuan fondasi tiang dalam menahan beban lateral yang bekerja secara horizontal. Pengujian ini penting untuk memastikan stabilitas fondasi terhadap gaya-gaya seperti angin, gempa, atau tekanan tanah (Hardiatmo, 2008).

Standar proyek yang mewajibkan pelaksanaan *lateral load test* terutama berlaku untuk proyek-proyek dengan beban lateral dominan seperti jembatan, menara, dan dermaga (SNI 8460, 2017). Selain itu, proyek di daerah rawan gempa (SNI 2833:2016), tanah lunak dengan kuat geser kurang dari 25 kPa (SNI 2827:2019), serta proyek strategis nasional juga memerlukan pengujian ini sebagai bagian dari verifikasi kinerja fondasi.



Gambar 2.6 Skema uji beban lateral tiang pile to beam

(Sumber : ASTM D3966, 2007)



Gambar 2.7 Skema uji beban lateral tiang *pile to pile*

(Sumber : ASTM D3966, 2007)

Hasil pengujian *lateral load test* umumnya direpresentasikan dalam bentuk grafik hubungan antara pembebanan (p) dengan defleksi (y) yang dikenal sebagai kurva p - y . Kurva ini sangat bermanfaat untuk memahami perilaku tiang dan tanah sekelilingnya terhadap beban lateral. Berdasarkan (ASTM D3966, 2007), pengujian dapat dihentikan ketika defleksi melebihi 15% diameter tiang atau ketika terjadi ketidakstabilan beban yang menunjukkan telah tercapainya kapasitas ultimit tiang.

Menurut (ASTM D3966, 2007) uji ini bertujuan untuk menentukan:

1. Kapasitas ultimit tiang terhadap beban lateral.
2. Defleksi tiang pada berbagai tingkat pembebanan.
3. Karakteristik respons tanah terhadap beban lateral.

Peralatan utama untuk uji lateral meliputi :

1. Sistem Pembebanan
 - *Hydraulic jack* atau sistem *winch* untuk memberikan beban lateral.
 - *Reaction frame* atau tiang reaksi untuk menahan gaya lawan.
2. Alat Ukur Deformasi
 - *Dial gauge* (akurasi $\pm 0,01$ mm) atau LVDT untuk mengukur defleksi.
 - *Inclinometer* (jika diperlukan pengukuran rotasi tiang).
3. Pencatatan Data

- *Data logger* untuk merekam beban dan defleksi secara *real-time*.

4. Peralatan Pendukung

- *Load cell* untuk mengkalibrasi beban.
- *Strain gauge* (opsional, untuk analisis distribusi momen).



Gambar 2.8 Contoh *Lateral Test Pile*

(Sumber : Proyek Kedutaan Besar India)

2.5 Penelitian yang Relevan

Penelitian oleh (Kurnia et al., 2023) membandingkan metode Broms dengan pendekatan *p-y curve* (menggunakan *software* LPILE) untuk kondisi tanah berlapis (lempung-pasir). Penelitian ini mengungkap bahwa metode Broms menghasilkan defleksi lateral yang lebih besar dibandingkan *p-y curve* maupun pengujian lapangan, terutama pada tanah lempung. Namun pada tanah pasir, hasil Broms cukup mendekati data lapangan, yang menunjukkan metode ini dapat digunakan sebagai pendekatan awal pada analisis fondasi dengan tanah homogen. Penelitian ini menekankan keterbatasan metode Broms pada tanah berlapis dan menunjukkan perlunya verifikasi hasil perhitungan dengan pendekatan numerik seperti *p-y curve* atau *finite element* (FED 2D) untuk meningkatkan akurasi dan keandalan desain.

Penelitian oleh (Kawengian et al., 2018) menganalisis kapasitas dukung lateral fondasi tiang pancang kelompok di dermaga dengan pendekatan metode Broms, Meyerhof, Evans-Duncan, serta perangkat lunak GEO5. Penelitian ini

menyoroti pentingnya mempertimbangkan beban lateral yang signifikan di dermaga akibat gelombang laut dan tumbukan kapal. Hasil menunjukkan bahwa metode Meyerhof memberikan nilai daya dukung lateral paling besar dengan defleksi paling kecil, dibandingkan metode lainnya. Metode Broms digunakan sebagai dasar perhitungan awal pada tanah homogen dengan hasil konservatif yang menjadi rujukan dalam verifikasi awal sebelum digunakan metode numerik atau eksperimental lanjutan.

Sementara itu, (Ba'ist et al., 2020) menganalisis defleksi lateral pada tiang tunggal di tanah lempung akibat beban lateral menggunakan tiga metode, yaitu metode kurva p-y dengan penyelesaian beda hingga, program ALLPILE V7.3B, dan program METODE ELEMEN HINGGA versi 8.6. Hasil menunjukkan bahwa defleksi terbesar terjadi pada perhitungan ALLPILE (1,21 cm untuk 10 kN; 2,13 cm untuk 15 kN; dan 3,14 cm untuk 20 kN), diikuti METODE ELEMEN HINGGA (0,27 cm; 0,4051 cm; 0,5402 cm), dan metode p-y (0,0629 cm; 0,0943 cm; 0,1258 cm). Batas beban yang disarankan adalah 15 kN agar defleksi tidak melebihi 2,54 cm.