

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Tanah

Tanah terbentuk melalui proses pelapukan batuan atau aktivitas geologi lainnya yang terjadi di permukaan bumi. Proses ini melibatkan pelapukan fisik dan kimia. Pelapukan fisik menyebabkan batuan terurai menjadi partikel-partikel kecil akibat pengaruh faktor eksternal seperti erosi, angin, air, es, aktivitas manusia, serta perubahan suhu atau kondisi cuaca. Sementara itu, pelapukan kimia terjadi akibat reaksi dengan unsur-unsur seperti oksigen, karbon dioksida, air (terutama yang mengandung zat asam atau alkali), dan reaksi kimia lainnya. Tanah yang terbentuk dan tetap berada di lokasi aslinya dikenal sebagai tanah residual (*residual soil*) sedangkan tanah yang telah berpindah dari tempat asalnya disebut tanah terangkut (*transported soil*) (Hardiyatmo, 2019).

Istilah pasir, lempung, lanau atau lumpur digunakan untuk menggambarkan ukuran partikel pada batas ukuran butiran yang telah ditentukan. Istilah yang sama juga digunakan untuk menggambarkan sifat tanah yang khusus. Tanah lempung adalah jenis tanah yang bersifat kohesif dan plastis, sedang pasir digambarkan sebagai tanah yang tidak kohesif dan tidak plastis (Hardiyatmo, 2019).

2.2 Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah *Unified Soil Classification System* (USCS) untuk pengelompokan tanah secara universal. Sistem USCS pertama kali diperkenalkan oleh Casagrande pada tahun 1942 untuk digunakan dalam proyek pembangunan lapangan terbang. Seiring waktu, sistem ini berkembang dan kini banyak diterapkan oleh para ahli teknik di berbagai bidang. USCS mengelompokkan tanah ke dalam dua kategori utama yaitu:

1. Tanah berbutir-kasar (*coarse-grained-soil*) merupakan jenis tanah seperti kerikil (*gravel*) dan pasir (*sand*), dimana kurang dari 50% berat total sampel tanah dapat melewati saringan no. 200. Tanah dalam kelompok ini diberi simbol awal G untuk kerikil (*gravel*) dan S untuk pasir (*sand*).
2. Tanah berbutir-halus (*fine-grained-soil*) adalah jenis tanah ini memiliki lebih dari 50% berat total sampel yang lolos dari saringan no. 200. Simbol

klasifikasinya dimulai dengan huruf M untuk lanau (*silt*) anorganik, C untuk lempung (*clay*) anorganik, dan O untuk lanau dan lempung organik. Selain itu, simbol PT digunakan untuk mengklasifikasikan tanah gambut (peat), muck, serta tanah dengan kandungan organik tinggi lainnya.

Secara lebih rinci, klasifikasi tanah dalam sistem USCS dapat dipahami dengan membaca grafik klasifikasi dari arah kiri ke kanan pada Tabel 2.1 (Bowles, 1989) untuk Tanah berbutir-kasar (*coarse-grained-soil*).

Tabel 2.1 Sistem Klasifikasi USCS

Major Division		Sym- bol	Typical Names	Classification Criteria for Coarse-Grained Soil	
Fine-Grained Soil (more than half of material is larger than No.200)	Gravels (more than half of Coarse Fraction is larger than No.4 Sieve Size)	Clean Gravels (little or no fines)	GW	Well-Graded Gravels, Gravel-Sand Mixtures, Little Or No Fines	$Cu \geq 4$ $1 \leq Cc \leq 3$
			GP	Poorly Graded Gravels, Gravel-Sand Mixtures, Little Or No Fines	Not meeting all gradation requirement for GW ($Cu < 4$ or $1 > Cc > 3$)
		Gravels with fines (appreciable)	GM	Silty Gravels, Gravel-Sand-Silt Mixture	Atteberg limits below A line or $Ip < 4$
			GC	Clayey Gravels, Gravel-Sand-Clay Mixture	Atteberg limits above A line or $Ip > 7$
	Sands (more than half of Coarse Fraction is smaller than No.4 Sieve Size)	Clean sand (little or no fines)	SW	Well-Graded Sands, Gravelly Sands, Little Or No Fines	$Cu \geq 6$ $1 \leq Cc \leq 3$
			SP	Poorly Graded Sands, 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 Sands, Sand-Silt Mixture	Atteberg limits below A line or $Ip < 4$
			SC	Clayey Sands, Sand-Silt Mixture	Atteberg limits above A line or $Ip > 7$
					Above A line with $4 < Ip < 7$ are borderline cases requiring use of dual symbols
	Silty and Clays (Liquid limit < 50)		ML	Inorganic Silts And Very Fine Sands, Rock Flour, Silty Or Clayey Fine Sands, Or Clayey Silts With Slight Plasticity	- Determine percentages of Sand and Gravel from Grain-size curve. - Depending on percentages of fines (fraction smaller than 200 sieve size). Coarse-grained soil are classified as follow: Less than 5%-GW, SW, SP More than 12%-GM, GC, SM, SC 5 to 12 % -Borderlines cases requiring dual symbols.
			CL	Inorganic Clays Of Very Low To Medium Plasticity, Gravelly Clays, Sandy Clays, Silty Clays, Lean Clays	

Major Division		Sym- bol	Typical Names	Classification Criteria for Coarse-Grained Soil
	<i>Silty and Clays (Liquid limit > 50)</i>	<i>OL</i>	<i>Organic Silts And Organic Silty Clays Of Low Plasticity</i>	
		<i>MH</i>	<i>Inorganic Silts, Micaceous Or Diatomaceous Fine Sandy Or Silty Soils, Elastic Silts</i>	
		<i>CH</i>	<i>Inorganic Clays Or High Plasticity, Fat Clays</i>	
		<i>OH</i>	<i>Organic Clays Of Medium To High Plasticity, Organic Silts</i>	
	<i>Highly Organic Soil</i>	<i>pT</i>	<i>Peat And Other Highly Organic Soils</i>	

Klasifikasi tanah berbutir-halus (*fine-grained-soil*) berdasarkan USCS dapat dilihat pada Tabel 2.2 (Bowles, 1989) berikut.

Tabel 2.2 Sistem Klasifikasi USCS Tanah Berbutir-Halus yang Lolos dari Saringan No.200

Soil	Major Divisions	Group Symbol	Identification Procedures on Fraction Smaller than No. 40 Sieve Size		
			Dry Strength	Dilatancy	Toughness
<i>Silt and Clays</i>	<i>Liquid Limit Less than 50</i>	<i>ML</i>	<i>None to Slight</i>	<i>Quick to Slow</i>	<i>None</i>
		<i>CL</i>	<i>Medium to High</i>	<i>None to Very Slow</i>	<i>Medium</i>
		<i>OL</i>	<i>Slight to Medium</i>	<i>Slow</i>	<i>Slight</i>
	<i>Liquid Limit More than 50</i>	<i>MH</i>	<i>Slight to Medium</i>	<i>Slow to None</i>	<i>Slight to Medium</i>
		<i>CH</i>	<i>High to Very High</i>	<i>None</i>	<i>High</i>
		<i>OH</i>	<i>Medium to High</i>	<i>None to Very Slow</i>	<i>Slight to Medium</i>
<i>Highly Organic Soils</i>		<i>Pt</i>	<i>Readily Identified by Color, Odor, Spongy Feel and Frequently by Fibrous Texture</i>		

2.2.1 Klasifikasi Tanah berdasarkan Data *Standard Penetration Test* (SPT)

1. Tanah Pasir dan Kerikil

Tanah pasir dan kerikil merupakan tanah dengan nilai N tinggi menunjukkan bahwa tanah tersebut cukup padat dan mampu mendukung beban yang lebih besar. Pasir dan kerikil memiliki nilai N yang lebih tinggi dengan kisaran N-value antara 10 hingga 50, tergantung pada kedalaman dan jenis tanah.

2. Tanah Lempung

Tanah lempung merupakan jenis tanah yang lembek, memiliki N-value yang lebih rendah. Nilai N yang rendah menunjukkan daya dukung tanah tersebut rendah. Nilai N untuk tanah lempung dapat berkisar antara 0 hingga 10, tergantung pada konsistensi dan kedalaman tanah (Bowles, 1989).

3. Klasifikasi berdasarkan Nilai N

Menurut Peck, 1974 mengklasifikasikan tanah berdasarkan Nilai N yang diperoleh dari SPT untuk tanah kohesif tersaturasi dapat dilihat pada Tabel 2.3 dan Tabel 2.4 untuk tanah non kohesif (Amertunga dkk., 2016) berikut.

Tabel 2.3 Hubungan Nilai N dan ϕ dengan *Relative Density*

N-SPT	<i>Compactness</i>	<i>Relative Density, D_R (%)</i>	ϕ (°)
0-4	<i>Very Loose</i>	0-15	<28
4-10	<i>Loose</i>	15-35	28-30
10-30	<i>Medium</i>	35-65	30-36
30-50	<i>Dense</i>	65-85	36-41
>50	<i>Very Dense</i>	>85	>41

Tabel 2.4 Hubungan Nilai N dan q_u

<i>Consistency</i>	N-SPT	q_u (kPa)
<i>Very Soft</i>	0-2	<25
<i>Soft</i>	2-4	25-50
<i>Medium</i>	4-8	50-100
<i>Stiff</i>	8-15	100-200
<i>Very Stiff</i>	15-30	200-400
<i>Hard</i>	>30	>400

2.2.2 Klasifikasi Tanah berdasarkan Data *Cone Penetration Test* (CPT)

Berdasarkan data yang diperoleh dari data sondir, tipe tanah dikelompokkan dari berbagai sistem klasifikasi. Penentuan jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 2.5 (Amertunga dkk., 2016). Beberapa klasifikasi tanah berdasarkan nilai q_c , f_s , dan rasio f_s/q_c sebagai berikut:

1. Tanah Pasir

Tanah pasir memiliki nilai q_c yang relatif tinggi, menunjukkan tanah yang keras dan stabil terhadap penetrasi konus. Nilai f_s relatif rendah karena gesekan antara selongsong dan pasir lebih kecil. Rasio f_s/q_c cenderung rendah, sering kali kurang dari 1 (Robertson & Campanella, 1983).

2. Tanah Lempung

Tanah lempung umumnya memiliki nilai q_c yang lebih rendah dibandingkan dengan pasir, menunjukkan daya dukung tanah yang lebih rendah. Nilai f_s lebih tinggi karena adanya kohesi yang lebih kuat antara partikel tanah. Rasio f_s/q_c biasanya lebih besar dari 1 menunjukkan adanya pengaruh kohesi yang dominan dalam pengujian Tabel 2.5 (Robertson, 2009).

Tabel 2.5 Korelasi antara q_c dan Relative Density dengan Friction Angle untuk Tanah Tidak Kohesi

<i>Compactness</i>	<i>Relative Density (%)</i>	<i>N-SPT</i>	<i>q_c (MPa)</i>	<i>$\phi(^{\circ})$</i>
<i>Very Loose</i>	<0,2	0-4	<2	<30
<i>Loose</i>	0,2-0,4	4-10	2-4	30-35
<i>Medium</i>	0,4-0,6	10-30	4-12	35-40
<i>Dense</i>	0,6-0,8	30-50	12-20	40-45
<i>Very Dense</i>	>0,8	>50	>20	>45

2.3 Penyelidikan Tanah

Penyelidikan tanah bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik setiap lapisan tanah serta menentukan daya dukung tanah yang akan menjadi dasar dalam perancangan fondasi guna memastikan kestabilan bangunan di atasnya. Secara umum, tujuan dari penyelidikan tanah (Badan Standardisasi Nasional, 2017) meliputi:

1. Menilai kesesuaian kondisi lapisan tanah di lokasi yang direncanakan untuk pembangunan.

2. Memperoleh parameter tanah yang diperlukan untuk analisis dan perancangan struktur.
3. Menentukan nilai daya dukung tanah sebagai dasar dalam perhitungan fondasi.
4. Mengidentifikasi jenis fondasi yang sesuai untuk menopang beban struktur atas, berdasarkan daya dukung izin dan potensi penurunan tanah.
5. Merancang langkah-langkah antisipasi untuk mengatasi potensi permasalahan yang mungkin timbul selama proses konstruksi berlangsung.

2.3.1 Pengujian *Standard Penetration Test* (SPT)

Berdasarkan Badan Standardisasi Nasional, 2008 tentang “Cara Uji Penetrasi Lapangan dan Pengambilan Tanah *Split Barrel*”, uji penetrasi dilakukan untuk mengukur kekuatan tanah. Metode ini menggunakan sistem beban jatuh dengan palu seberat 63,5 kg yang dijatuhkan dari ketinggian 76 cm. Jumlah pukulan palu dihitung untuk setiap penetrasi sedalam 15 cm. Pada tahap awal, pukulan dicatat sebagai dudukan (*seating*) sedangkan total pukulan pada tahap kedua dan ketiga dijumlahkan untuk mendapatkan nilai N-SPT atau perlawanan SPT, yang dinyatakan dalam satuan pukulan per 0,3 meter. Proses pengeboran dihentikan apabila telah mencapai lapisan tanah keras yang ditandai dengan nilai N-SPT > 50 selama tiga kali berturut-turut.

Pengujian *Core Drilling* dilakukan untuk mengambil sampel tanah asli pada titik-titik yang telah ditentukan menggunakan alat bor mesin, dengan acuan standar ASTM D1452-80. Selama proses pengeboran, juga dilakukan SPT pada interval tertentu sesuai dengan rencana pengujian. Sampel tanah yang diambil tanpa mengalami gangguan (*undisturbed sample*) kemudian dibawa ke laboratorium untuk dilakukan pengujian guna mengetahui sifat-sifat fisik dan karakteristik keteknikannya.

2.3.2 Pengujian Sondir atau *Cone Penetration Test* (CPT)

Pengujian sondir atau CPT merupakan salah satu metode uji penetrasi statis yang digunakan dalam investigasi geoteknik untuk menentukan karakteristik mekanis tanah secara *in-situ*. CPT dilakukan dengan menekan konus berbentuk kerucut ke dalam tanah dengan kecepatan konstan, biasanya 2 cm/detik, sambil

mengukur hambatan ujung (*cone resistance*, q_c) dan gesekan selubung (*sleeve friction*, f_s).

Pekerjaan CPT atau Sondir dilakukan dengan menggunakan alat sondir ringan dengan kapasitas max 250 kg/cm² atau sampai kedalaman tanah 20 meter. Maksud pengujian ini untuk mengetahui kedalaman lapisan tanah/batuan keras secara cepat serta sifat daya dukung maupun daya lekat pada setiap kedalaman (interval 20 cm). Acuan yang dipakai dalam melaksanakan pekerjaan ini adalah ASTM D 1586 – 99 atau SNI 03-2827.

2.3.3 Pengujian Laboratorium dalam Penyelidikan Tanah

Pengujian laboratorium dilakukan pada sampel tanah tidak terganggu (*undisturbed sample*) yang diambil dari lapangan untuk menentukan berbagai parameter, karakteristik tanah, baik sifat fisik maupun sifat mekaniknya. Seluruh pengujian ini mengikuti prosedur standar ASTM dengan beberapa penyesuaian yang disesuaikan kondisi tanah yang diuji. Jenis dan macam pengujian laboratorium yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Sifat Fisik (*Index Properties*)

Sifat fisik tanah merupakan karakteristik dasar yang mempengaruhi perilaku tanah dalam mendukung beban struktur. Uji laboratorium pada penyelidikan tanah bertujuan untuk mengidentifikasi parameter fisik utama seperti kadar air, berat jenis, distribusi ukuran butiran, batas atterberg, dan kepadatan tanah. Data hasil uji ini digunakan dalam perancangan fondasi, analisis stabilitas lereng, serta studi daya dukung tanah. Sifat fisik tanah berkaitan dengan tekstur, komposisi, dan kondisi material penyusun tanah yang mempengaruhi sifat mekanisnya (Amertunga dkk., 2016). Menurut Budhu, (2015) sifat fisik tanah merupakan faktor utama dalam menentukan daya dukung tanah serta respons tanah terhadap pembebanan eksternal.

2. Sifat Teknik (*Mechanical Properties*)

Sifat mekanis tanah merupakan karakteristik tanah yang berhubungan dengan respons tanah terhadap beban eksternal, seperti Tegangan, geser, dan deformasi. Pengujian laboratorium terhadap sifat mekanis tanah bertujuan untuk menentukan parameter penting seperti kuat geser, modulus elastisitas, daya dukung tanah, dan perilaku pemadatan. Data hasil uji ini sangat penting dalam perancangan

fondasi, analisis stabilitas lereng, dan rekayasa geoteknik secara umum. Menurut Amertunga dkk., (2016) dalam *Principles of Geotechnical Engineering*, sifat mekanis tanah sangat dipengaruhi oleh komposisi mineral, kadar air, dan struktur butiran tanah.

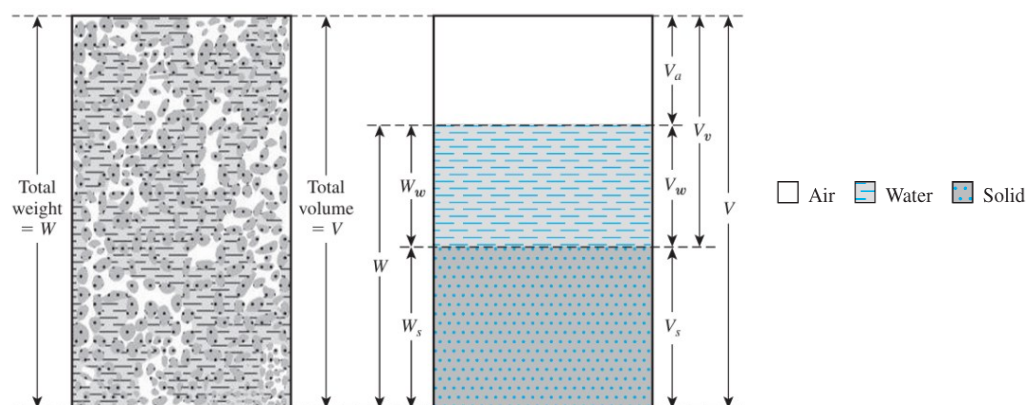
Sementara itu Murthy, (2019) dalam *Soil Mechanics in Engineering Practice* menjelaskan bahwa sifat mekanis tanah menentukan kapasitas tanah dalam menahan beban serta stabilitas terhadap gaya geser. Hasil evaluasi dari penyelidikan lapangan dan analisis laboratorium ini digunakan untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan, distribusi tegangan, dan sifat teknis tanah. Data ini kemudian menjadi parameter desain yang penting untuk menghitung daya dukung fondasi, menentukan jenis fondasi yang sesuai, serta mendukung perencanaan struktur bawah lainnya.

2.4 Korelasi Parameter Tanah

Nilai parameter tanah dapat dilakukan pendekatan atau korelasi antara hasil uji di lapangan dengan kondisi tanah yang diuji. Nilai N-SPT yang diperoleh kemudian dikorelasikan berdasarkan teori-teori yang relevan. Dalam perencanaan daya dukung aksial dan lateral fondasi ada beberapa parameter tanah yang harus diketahui, di antaranya:

1. Hubungan antara Berat dan Volume

Tanah terdiri dari 3 elemen yaitu air, udara, dan butir tanah. Sedangkan untuk tanah kering terdiri dari 2 elemen yaitu udara dan butir tanah. Elemen-elemen tanah dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Elemen pada Tanah

Pada Gambar 2.1 (M.Das & SObhan, 2012) dapat disimpulkan secara umum persamaan volume tanah dan persamaan berat tanah sebagai berikut.

$$V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a \quad (2.1)$$

Keterangan:

V_s = volume tanah

V_w = volume air

V_a = volume udara

$$W = W_s + W_w \quad (2.2)$$

Keterangan:

W_s = berat tanah

W_w = berat air

Hubungan dari volume menghasilkan 3 parameter terhadap tanah yaitu air pori (e), porositas (n), dan derajat saturasi (S_r). Persamaan yang digunakan pada ketiga parameter sebagai berikut.

$$e = \frac{G_s \times W_c}{S_r} \quad (2.3)$$

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (2.4)$$

$$S_r = \frac{W_c \times G_s}{e} \quad (2.5)$$

Hubungan dari berat menghasilkan 2 parameter yaitu *water content* (W_c) dan berat isi (γ). Persamaan yang digunakan pada kedua parameter sebagai berikut.

$$W_c = \frac{\gamma_t - \gamma_d}{\gamma_d} \times 100 \quad (2.6)$$

$$\gamma_t = G_s \times \gamma_w (1 - n)(1 + W_c) \quad (2.7)$$

$$\gamma_d = G_s \times \gamma_w (1 - n) \quad (2.8)$$

$$\gamma_{sat} = ((1 - n)G_s + n) \times \gamma_w \quad (2.9)$$

2. Kohesi (c)

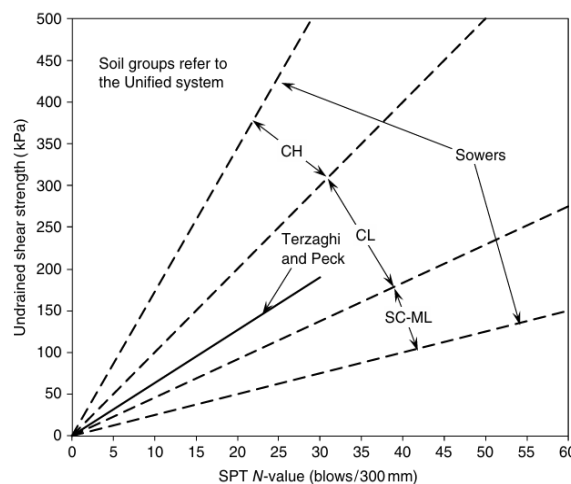
Kohesi adalah gaya tarik menarik antara partikel dalam tanah, dinyatakan dalam satuan berat per satuan luas. Kohesi tanah akan semakin besar jika kekuatan gesernya makin besar. Nilai kohesi (c) diperoleh dari pengujian laboratorium yaitu

pengujian kuat geser langsung (*direct shear strength test*) dan pengujian triaksial (*triaxial test*). Kohesi berbanding lurus dengan kerapatan suatu benda, sehingga bila kerapatan semakin besar maka kohesi yang akan didapatkan semakin besar. Tabel korelasi dapat dilihat pada Tabel 2.6 (Look, 2015) berikut.

Tabel 2.6 Hubungan Variasi Konsistensi N-SPT, dan Kohesi pada Tanah Lempung Tak Terdrainase.

<i>Soil Descriptions</i>	N-SPT	c
	<i>Uncorrected Value</i>	(kN/m ²)
<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

Pendekatan ulang dapat dilakukan menggunakan Gambar 2.2 berikut. Dapat dilihat bahwa nantinya terdapat sebaran tanah yang signifikan menentukan berada pada garis mana dengan acuan nilai c_u/N -SPT.



Gambar 2.2 Perkiraan Korelasi Antara Kuat Geser Tak Terdrainase dan Nilai N-SPT

3. Sudut Geser Dalam Tanah (ϕ)

Sudut geser dalam merupakan sudut yang dibentuk dari hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser di dalam material tanah atau batuan. Sudut geser dalam adalah sudut rekahan yang dibentuk jika suatu material dikenai tegangan atau gaya terhadapnya yang melebihi tegangan gesernya. Besaran nilai

sudut geser dalam (ϕ) juga berkaitan dengan tingkat kepadatan suatu jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 2.7 (Look, 2015) berikut.

Tabel 2.7 Nilai Tipikal antara Sudut Geser Dalam dan Jenis Tanah Pasir

<i>Soil Descriptions</i>	N-SPT	Strength
	<i>Uncorrected Value</i>	ϕ (°)
<i>Very loose</i>	<4	<20
<i>Loose</i>	4-10	28-30
<i>Medium dense</i>	10-30	30-40
<i>Dense</i>	30-50	40-45
<i>Very dense</i>	>50	45-50

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

Kohesi efektif (c') dan sudut geser efektif (ϕ') merupakan parameter penting dalam mekanika tanah yang digunakan untuk mengevaluasi kekuatan geser tanah, khususnya dalam analisis stabilitas lereng, daya dukung tanah, dan desain pondasi. Berdasarkan klasifikasi dari Tabel 2.8 Amertunga dkk., (2016) berikut nilai-nilai kohesi efektif dan sudut geser efektif dibedakan berdasarkan kelompok tanah, yaitu *Poor*, *Average*, *Good*, dan *Very Good*.

Tabel 2.8 Nilai Tipikal Kohesi Efektif (c') dan Sudut Geser Efektif (ϕ')

<i>Soil group</i>	<i>Typical soils in group</i>	<i>Soil Parameters</i>	
		c' (kPa)	ϕ' (°)
<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

5. 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 2.9 (Amertunga dkk., 2016) berikut.

Tabel 2.9 Nilai Tipikal Berat Isi Tanah Normal dan Tersaturasi

Jenis Tanah		Berat volume kering (kN/m ³)		Berat volume jenuh (kN/m ³)	
		Lepas	Padat	Lepas	Padat
Tanah Granulaer	Kerikil	16,0	18,0	20,0	21,0
	Pasir bergradasi baik dan kerikil	19,0	21,0	21,5	23,0
	Pasir kasar atau sedang	16,5	18,5	20,0	21,5
	Pasir bergradasi baik	18,0	21,0	20,5	22,5
	Pasir halus atau kelanauan	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>Slag fill</i>	12,0	15,0	18,0	20,0
	<i>Ash fill</i>	6,5	10,0	13,0	21,5
Tanah Kohesif	Gambut (Variabilitas)	12,0		12,0	
	Lempung organik	15,0		15,0	
	Lempung lunak	17,0		17,0	
	Lempung padat	18,0		18,0	
	Lempung kaku	19,0		19,0	
	Lempung keras	20,0		20,0	
	Lempung glasial keras atau kaku	21,0		21,0	

6. 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 jenis tanah berdasarkan nilai SPT dengan Tabel 2.10 (Amertunga dkk., 2016) pada halaman selanjutnya.

Tabel 2.10 Nilai Tipikal n , e , w untuk Tanah Asli

Jenis tanah	n (%)	e_0	w (%)
Pasir seragam, tidak padat	46	0,85	32
Pasir seragam, padat	34	0,51	19
Pasir berbutir campuran	40	0,67	25
Pasir berbutir campuran	30	0,43	16
Lempung lunak sedikit	66	1,90	70
Lempung lunak sangat	75	3,00	110

7. Rasio Poisson (μ)

Poisson's ratio (rasio Poisson) merupakan parameter mekanik yang menggambarkan perbandingan antara regangan lateral dan regangan aksial suatu material saat dikenai beban. Nilai rasio ini penting dalam analisis perilaku deformasi tanah dan material teknik lainnya. Berdasarkan data dari Bowles (1986), Kulhawy dan Mayne (1990), serta Lambe dan Whitman (1979), nilai poisson's ratio bervariasi tergantung pada jenis material. Rentang nilai dapat dilihat pada Tabel 2.11 Amertunga dkk., (2016) berikut.

Tabel 2.11 Nilai Tipikal dari Rasio Poisson

Material	Poisson's ratio, μ_s		
<i>Saturated clays (undrained)</i>	0,50		
<i>Saturated clays (drained)</i>	0,20	-	0,40
<i>Dense Sand</i>	0,30	-	0,40
<i>Loose Sand</i>	0,10	-	0,30
<i>Loess</i>	0,10		0,30
<i>Ice</i>	0,36		
<i>Alumunium</i>	0,35		
<i>Steel</i>	0,29		
<i>Concrete</i>	0,15		

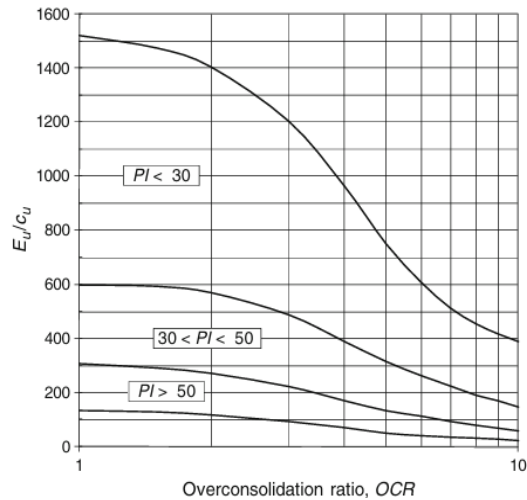
8. Modulus Elastisitas (E_u)

Nilai modulus elastisitas menunjukkan besarnya nilai elastisitas tanah yang merupakan perbandingan antara tegangan yang terjadi terhadap regangan. Nilai ini bisa didapatkan dari *Traxial Test*. Nilai modulus elastisitas (E) secara empiris dapat ditentukan dari jenis tanah dengan korelasi pada Tabel 2.12 (Bowles, 1989) berikut.

Tabel 2.12 Nilai Perkiraan Parameter Modulus Elastis dari Beberapa Variasi Tanah

Strength of Soil	Elastic modulus, E (MPa)	
	Shortterm	Longterm
Type Gravel		
Loose	25–50	
Medium	50–100	
Dense	100–200	
Type Medium to Coarse Sand		
Very loose	< 5	
Loose	3-10	
Medium dense	8-30	
Dense	25-50	
Very dense	40-100	
Type Fine Sand		
Loose	5-10	
Medium	10-25	
Dense	25-50	
Type Silt		
Soft	<10	<8
Stiff	10-20	8-15
Hard	>20	>15
Type Clay		
Very Soft	<3	<2
Soft	2-7	1-5
Firm	5-12	4-8
Stiff	10-25	7-20
Very Stiff	20-50	15-35
Hard	40-80	30-60

Modulus Elastisitas (E_u) adalah parameter yang digunakan sebagai penentuan nilai kekakuan. E_u juga dapat diestimasikan dari nilai rasio modulus E_u/c , yang umumnya berkisar antara 100-1000. Nilai dapat diperoleh dari Gambar 2.3 yang diusulkan oleh Duncan dan Buchignani (1976) dan Angkatan Darat AS (1994).



Gambar 2.3 Perkiraan Korelasi antara E_u/c_u dengan Nilai OCR terhadap garis Indeks Plastisitas

9. Tegangan Vertikal Efektif

Tegangan vertikal efektif merupakan komponen utama dalam mekanika tanah yang menggambarkan besarnya tegangan tanah yang benar-benar diteruskan melalui butiran tanah dan mempengaruhi kekuatan serta deformasi tanah. Persamaan untuk memperoleh nilai tegangan vertikal efektif sebagai berikut.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.10)$$

Keterangan:

σ = *total stress*

σ' = *effective stress*

u = *pore water pressure*

Tegangan normal total pada bidang di dalam masa tanah, yaitu tegangan yang dihasilkan dari beban akibat berat total tanah termasuk air dalam ruang pori, persatuan luas bidangnya, yang arahnya tegak lurus bidang. Tegangan normal efektif pada bidang di dalam tanah, yaitu tegangan yang dihasilkan dari beban akibat berat butiran tanah persatuan luas bidangnya. Tegangan air pori disebut juga dengan tegangan netral yang bekerja ke segala arah sama besar, yaitu tegangan air yang mengisi rongga diantara butiran padat.

2.5 Klasifikasi Fondasi

Fondasi merupakan bangunan struktur paling bawah di bangunan yang meneruskan beban di atasnya menuju bawah tanah fondasi. Terdapat 2 klasifikasi fondasi sebagai berikut:

2.5.1 Fondasi Dangkal

Fondasi dangkal adalah untuk mengarahkan beban ke lapisan bumi, maka fondasinya adalah tempat yang paling kuat. Fondasi dangkal memiliki kedalaman yang kurang dari atau sama dengan lebar fondasi ($D_f/B \leq 1$). Pada tahun 1940, Terzaghi ada lima kategori untuk fondasi dangkal:

1. Fondasi Setempat (*Single Footing*)
2. Fondasi Menerus (*Continous Footing*)
3. Fondasi Telapak
4. Fondasi Rakit
5. Fondasi Sarang Laba-laba

2.5.2 Fondasi Dalam

Tanah yang kuat berada di bawah tanah yang relatif dalam, maka fondasi dalam dibangun dimulai dari atas permukaan bumi sampai tanah yang keras guna untuk menopang dan mentransferkan berat fondasi dan berat struktur di atasnya. (Hardiyatmo, 2023). Berikut jenis-jenis fondasi dalam:

1. Fondasi Tiang Pancang (*Precast Pile*)
2. Fondasi Tiang Bor (*Cast in Place*)

2.6 Fondasi Tiang Pancang

Fondasi tiang pancang adalah jenis fondasi dalam yang digunakan untuk mentransfer beban bangunan atau struktur ke lapisan tanah yang lebih dalam dan lebih kuat. Fondasi tiang pancang umumnya digunakan pada bangunan tinggi, jembatan, atau struktur lain yang memerlukan dukungan kuat pada tanah dengan daya dukung rendah atau tanah yang labil. Fondasi tiang pancang adalah solusi yang efektif untuk mendukung bangunan atau struktur di atas tanah yang memiliki daya dukung rendah atau tanah yang tidak stabil.

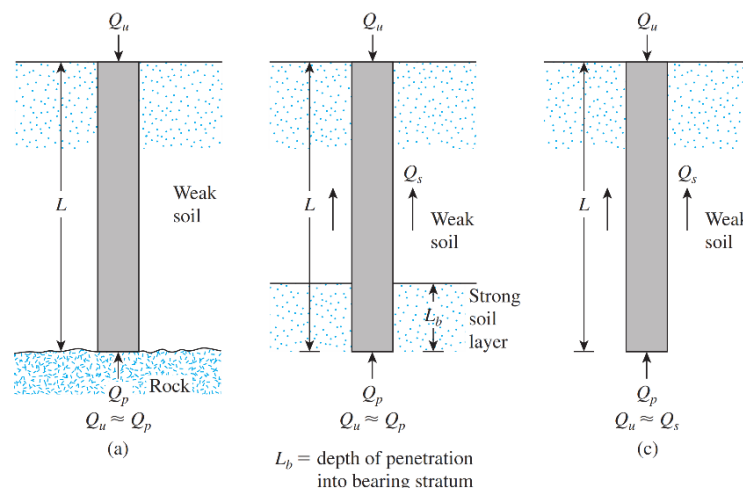
Kelebihan fondasi tiang pancang meliputi proses pemasangan yang cepat, tiang yang diproduksi di pabrik dengan pengawasan kualitas ketat, serta

kemampuan mencapai kedalaman yang diinginkan melalui penyambungan. Tiang pancang mudah diperoleh, pelaksanaannya tidak terpengaruh oleh tinggi muka air tanah, sangat kuat, dan tahan lama, bahkan terhadap air dan bahan korosif. Selain itu, beton berkualitas tinggi yang digunakan menjamin kekuatan tegangan yang optimal, dan pengaruh air tanah pada pemasangan sangat kecil.

Kekurangan fondasi tiang pancang antara lain kesulitan mobilisasi tiang beton berdiameter besar, menimbulkan suara, getaran, dan deformasi tanah yang dapat menyebabkan gangguan kebisingan serta kerusakan pada bangunan sekitar, kepala tiang bisa pecah akibat pemukulan yang tidak tepat, membutuhkan persiapan penyambungan khusus yang jika tidak baik dapat merugikan, harga lebih mahal, dan pembuatan tiang pancang memakan waktu lama.

2.7 Daya Dukung Fondasi Tiang Pancang

Kapasitas daya dukung tiang adalah kemampuan atau kapasitas tiang dalam mendukung beban di atasnya (Hardiyatmo, 2023). Daya dukung merupakan tahanan geser tanah untuk melakukan perlawanan terhadap penurunan yang diakibatkan oleh beban-beban, yang merupakan tahanan geser yang bekerja pada tanah diikuti bidang gesernya. Mekanisme transfer beban dapat dilihat pada Gambar 2.4 (Braja M.Das, 2016) berikut.



Gambar 2.4 Mekanisme Transfer beban pada Fondasi

Berdasarkan Gambar 2.4 (Braja M.Das, 2016) mekanisme transfer beban digolongkan berdasarkan transfer beban pada ujung fondasi yang dimana berada dalam zona tanah yang lunak berada di atas tanah keras. Tiang-tiang dipancang

sampai kedalaman tanah menembus batuan. Transfer beban selimut fondasi adalah perlawanan gaya gesek antara dinding fondasi dan tanah di sekitarnya.

Persamaan daya dukung tanah izin Fondasi tiang pancang dapat dilihat sebagai berikut:

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FK} = \frac{Q_p + Q_s}{FK} \quad (2.11)$$

Keterangan:

Q_{all} = daya dukung izin (kN)

Q_u = daya dukung ultimit (kN)

Q_p = daya dukung ujung (kN)

Q_s = daya dukung selimut (kN)

FK = faktor keamanan (minimum 2,5 sesuai SNI 8460:2017)

Persamaan umum yang digunakan pada daya dukung ultimit serupa dengan persamaan fondasi dangkal yaitu.

$$q_u = 1,3c'N_c + qN_q + 0,3\gamma BN_\gamma \quad (2.12)$$

$$q_u = c'N_c F_{cs} F_{cd} + qN_q F_{qs} F_{qd} + 0,3\gamma BN_\gamma F_{\gamma s} f_{\gamma d} \quad (2.13)$$

$$q_u = c'N_c^* + qN_q^* + \gamma BN_\gamma^* \quad (2.14)$$

Pada persamaan ini notasi D diubah dengan notasi B sebagai berikut.

$$q_u = q_p = c'N_c^* + qN_q^* + \gamma DN_\gamma^* \quad (2.15)$$

Karena lebar D pada tiang pancang relatif kecil, maka dihilangkan dengan demikian persamaan pondasi dalam tiang pancang umumnya sebagai berikut.

$$q_p = c'N_c^* + qN_q^* \quad (2.16)$$

$$Q_u = A_p \times q_p = A_p (c'N_c^* + qN_q^*)$$

Keterangan:

A_p = area

q_p = daya dukung ujung

c' = kohesi pada tanah lempung

N_c^* = faktor daya dukung

N_q^* = faktor daya dukung

q' = tegangan vertikal efektif

2.7.1 Kapasitas Daya Dukung Aksial dengan Metode Analitik

1. Daya Dukung Selimut, Q_s

a. Metode Alpha, α

Metode alpha daya dukung selimut untuk tanah lempung dilakukan dengan persamaan sebagai berikut.

$$f = \alpha \times c_u \quad (2.17)$$

$$Q_s = \sum f p \Delta L = \sum \alpha c_u p \times \Delta L \quad (2.18)$$

Keterangan:

α = faktor adhesi (Tabel 2.13)

Korelasi yang diusulkan oleh Randolph and Murphy (1987) pada American Petroleum Institute (API) in 1987 menggunakan persamaan berikut.

$$\alpha = \left(\frac{c_u}{\sigma'_v} \right)^{-0,5} \quad \left(\text{for } \frac{c_u}{\sigma'_v} \leq 1 \right) \quad (2.19)$$

Tabel 2.13 Variasi Nilai α , diusulkan Terzaghi, Peck dan Mesri (1996)

c_u/Pa	α
$\leq 0,1$	1,00
0,2	0,92
0,3	0,82
0,4	0,74
0,6	0,62
0,8	0,54
1,0	0,48
1,2	0,42
1,4	0,40
1,6	0,38
1,8	0,36
2,0	0,35
2,4	0,34
2,8	0,34

Selain Tabel 2.13 interpolasi nilai α juga dapat menggunakan Tabel 2.14 berikut.

Tabel 2.14 Variasi Nilai α terhadap 2 Keadaan Tiang

c_u/σ'_v	α	
	<i>Open-ended pile</i>	<i>Closed-ended pile</i>
1	0,5	0,5
2	0,4	0,44
3	0,355	0,41
4	0,33	0,395
5	0,31	0,38
6	0,29	0,365
7	0,28	0,35
8	0,26	0,33
9	0,255	0,32
10	0,25	0,31

b. (Metode Betha, β)

Metode betha adalah salah satu pendekatan untuk menghitung daya dukung aksial tiang pancang, terutama dalam menentukan kontribusi gesekan selimut yang dihasilkan oleh interaksi antara permukaan tiang dan tanah sekitarnya. Metode ini mengasumsikan bahwa tegangan geser pada selimut tiang sebanding dengan tegangan vertikal efektif tanah pada kedalaman tertentu dengan faktor koefisien betha (β). Pada perhitungan daya dukung selimut menggunakan metode β persamaan tersebut digunakan untuk tanah lempung (*clay*) dan tanah pasir (*sand*). Persamaan daya dukung selimut fondasi sebagai berikut:

$$Q_s = \sum P \times \Delta l (\beta \times \sigma'_v) \quad (2.20)$$

Keterangan:

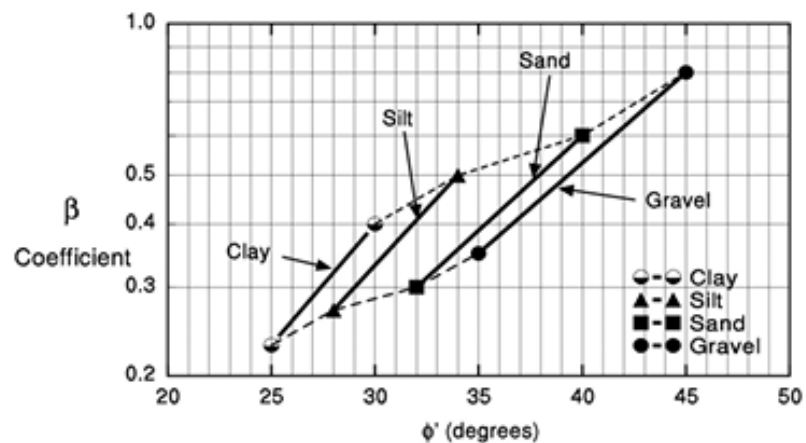
P = keliling tiang (m)

Δl = panjang segmen tiang (m)

β = koefisien betha = $K \times \tan \delta = ((1 - \sin \delta) \times OCR^{0.5}) \times \tan \delta$ faktor

σ'_v = tegangan vertikal efektif (kPa)

Untuk nilai β dapat juga ditentukan menggunakan grafik pada Gambar 2.5 dan korelasi antara tipe tanah dengan nilai β pada Tabel 2.15 berikut.



Gambar 2.5 Grafik Estimasi Nilai β berdasarkan Tipe Tanah (Fellenius, 1991)

Tabel 2.15 Nilai tipikal untuk β , ϕ' (Fellenius, 1991)

<i>Soil Type</i>	ϕ'	β	N_t
<i>Clay</i>	25 – 30	0.23 – 0.40	3 – 30
<i>Silt</i>	28 – 34	0.27 – 0.50	20 – 40
<i>Sand</i>	32 – 40	0.30 – 0.60	30 – 150
<i>Gravel</i>	35 – 45	0.35 – 0.80	60 – 300

c. Metode Lambda, λ

Metode ini diusulkan oleh Vijayvergiya and Focht (1972), dengan asumsi bahwa perubahan tanah dikarenakan tegangan lateral pasif pada kedalaman tersebut dan rata-rata daya dukung selimut menggunakan persamaan berikut.

$$f_{av} = \lambda(\bar{\sigma}'_v + 2c_u) \quad (2.21)$$

$$Q_s = \Sigma p \times \Delta L \times f_{av}$$

Keterangan:

λ = koefisien lambda (Tabel 2.16)

$\bar{\sigma}'_v$ = tegangan vertikal efektif rata-rata

c_u = kohesi rata-rata

Tabel 2.16 Variasi Faktor nilai Lambda, λ

Panjang, L	λ
0	0,5
5	0,336
10	0,245
15	0,200

Panjang, L	λ
20	0,173
25	0,150
30	0,136
35	0,132
40	0,127
50	0,118
60	0,113
70	0,110
80	0,110
90	0,110

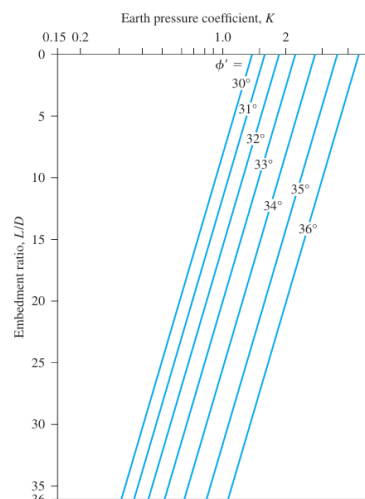
d. Metode Coyle dan Castello (1981)

$$Q_s = K \bar{\sigma}'_o \tan(0,8f)pL \quad (2.22)$$

Keterangan:

K = koefisien tekanan tanah (Gambar 2.6)

$\bar{\sigma}'_o$ = tekanan efektif overbuden



Gambar 2.6 Variasi Nilai Koefisien K

2. Daya Dukung Ujung, Q_p

a. Metode mayerhorf, 1976

Metode ini adalah salah satu pendekatan untuk menghitung daya dukung ujung tiang pancang Q_p . Metode ini mempertimbangkan karakteristik tanah dan dimensi tiang untuk menentukan kapasitas dukungnya.

Persamaan daya dukung ujung fondasi dalam, sebagai berikut:

$$Q_p = q_0 \times A_p \quad (2.23)$$

Persamaan daya dukung ujung fondasi untuk tanah lempung (*clay*) “ $\phi = 0$ ”, sebagai berikut:

$$q_p = (c \times N_c^*) \times A_p \quad (2.24)$$

Keterangan:

c = kohesi (kN/m^2)

N_c^* = faktor daya dukung tanah (Gambar 2.7)

A_p = luas tiang pancang rencana (m^2)

Persamaan daya dukung ujung fondasi untuk tanah pasir (*sand*) ($\phi > 0$), sebagai berikut:

$$q_p = (q \times N_q^*) \leq q_l = 0,5 \times p_a \times N_q^* \times \tan \phi = 50 \times N_q^* \times \tan \phi \quad (2.25)$$

Keterangan:

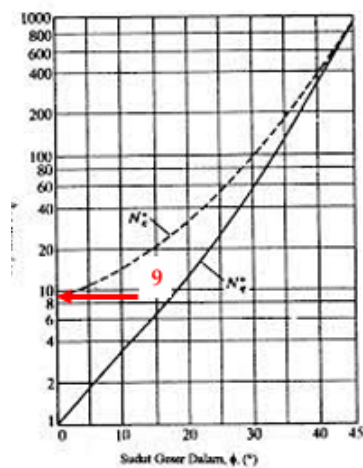
q_p = unit tahanan ujung (kPa)

q_l = batas unit tahanan ujung (kPa)

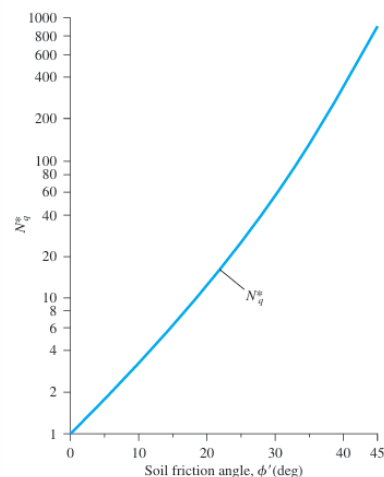
N_q^* = faktor daya dukung tanah (Gambar 2.7)

p_a = tekanan atmosfer (100 kPa)

ϕ = sudut geser dalam tanah pada ujung tiang



(a)



(b)

Gambar 2.7 Variasi Nilai (a) N_c^* dan (b) N_q^* terhadap Sudut Geser

Efektif

b. Metode Vesic (1997)

Tanah pasir metode ini mengusulkan berdasarkan perluasan rongga dengan menggunakan persamaan berikut.

$$Q_p = A_p \times q_q = A_p \times \bar{\sigma}'_v \times N_{\sigma}^* \quad (2.26)$$

Dimana,

$$\bar{\sigma}'_v = \left(\frac{1 + 2K_o}{3} \right) q' \quad (2.27)$$

$$K_o = 1 - \sin \phi' \quad (2.28)$$

$$N_{\sigma}^* = \frac{3N_q^*}{(1 + 2K_o)} \quad (2.29)$$

Keterangan:

$\bar{\sigma}'_v$ = tekanan vertikal efektif pada ujung tiang

N_{σ}^* = faktor daya dukung

K_o = tekanan

Tanah lempung tersaturasi perhitungan daya dukung ujung dapat dilakukan dengan persamaan berikut.

$$Q_p = A_p \times q_q = A_p \times c_u \times N_c^* \quad (2.30)$$

Dimana,

$$N_c^* = \frac{3}{4} (\ln I_{rr} + 1) + \frac{\pi}{2} + 1 \quad (2.31)$$

$$I_{rr} = I_r = \frac{E_s}{3c_u} \quad (2.32)$$

c. Metode Coyle dan Castello (1981)

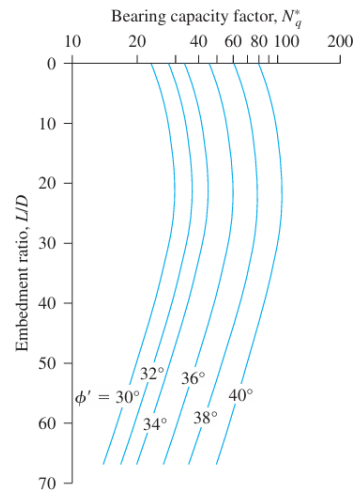
Metode ini menganalisis beban berskala besar terhadap tiang pancang pada tanah pasir. Berdasarkan hasil pengujian, menyarankan perhitungan pada tanah pasir menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$Q_p = \sigma'_v \times N_q^* \times A_p \quad (2.33)$$

Keterangan:

σ'_v = tekanan vertikal efektif pada ujung tiang

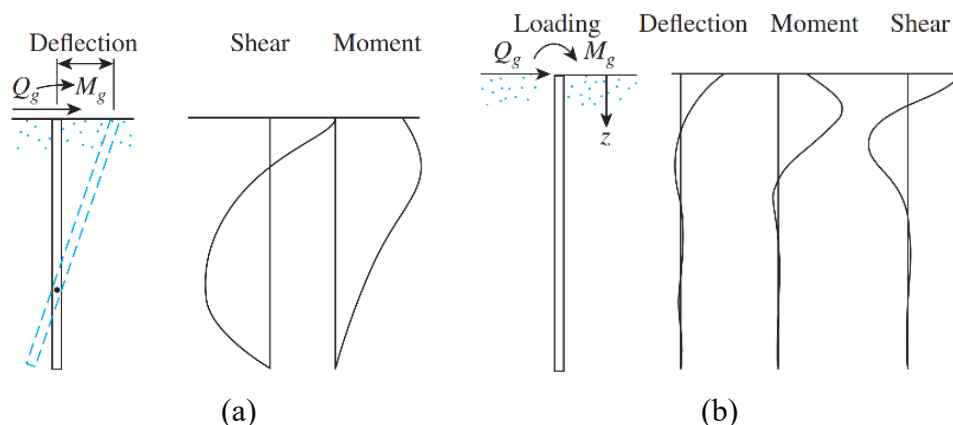
N_q^* = Faktor daya dukung (Gambar 2.8)



Gambar 2.8 Variasi Nilai N_q^* berdasarkan Nilai L/D

2.7.2 Kapasitas Daya Dukung Lateral dengan Metode Analitik

Analisis metode Broms (1965) membedakan berdasarkan jenis tanah dan kondisi kepala tiang. Tanah dikategorikan menjadi tanah kohesif (lempung) dan tanah non kohesif (pasir). Kondisi kepala tiang dapat berupa kepala bebas (*free head*) atau kepala jepit (*fixed head*). Pendekatan mempertimbangkan panjang dan kekakuan tiang untuk menentukan apakah tiang tersebut termasuk dalam kategori tiang pendek (*rigid*) atau tiang panjang (*elastic*). Pertimbangan sebuah tiang dengan panjang (L) yang memiliki gaya lateral (Q_g) dan momen (M_g) pada permukaan tanah ($z=0$), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 (Braja M.Das, 2016).



Gambar 2.9 Keadaan Defleksi, Momen, dan Geser Tiang Alami, (a) tiang pendek (*rigid*) dan (b) tiang panjang (*elastic*)

Sebelum menghitung kapasitas daya dukung lateral tiang tunggal. Maka dilakukan penentuan apakah tiang termasuk ke dalam kriteria tiang pendek (*short*

pile) apabila $L \leq 2T$ dan tiang panjang (*long pile*) apabila $L \geq 5T$. Penentuan berdasarkan faktor kekakuan R dan T .

Faktor kekakuan R digunakan untuk tanah lempung kaku terkonsolidasi berlebihan, modulus tanah dapat dianggap konstan di seluruh kedalamannya. Sedangkan, faktor kekakuan T untuk tanah lempung terkonsolidasi normal dan tanah granuler, modulus tanah dianggap tidak konstan/bertambah secara linear dengan kedalamannya. Persamaan dapat dilihat sebagai berikut:

$$R = \sqrt[4]{\frac{EI}{K_h \times d}} \quad (2.34)$$

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p \times I_p}{n_h}} \quad (2.35)$$

Keterangan:

d = diameter tiang (m)

R,T = faktor kekakuan relatif

E_p = modulus elastisitas tiang (kN/m^2)

I_p = momen inersia tiang (m^4)

n_h = koefisien variasi modulus dilihat pada Tabel 2.17 dan Tabel 2.18 (Braja M.Das, 2016).

Tabel 2.17 Perkiraan Nilai n_h Tanah Pasir/*Sand*

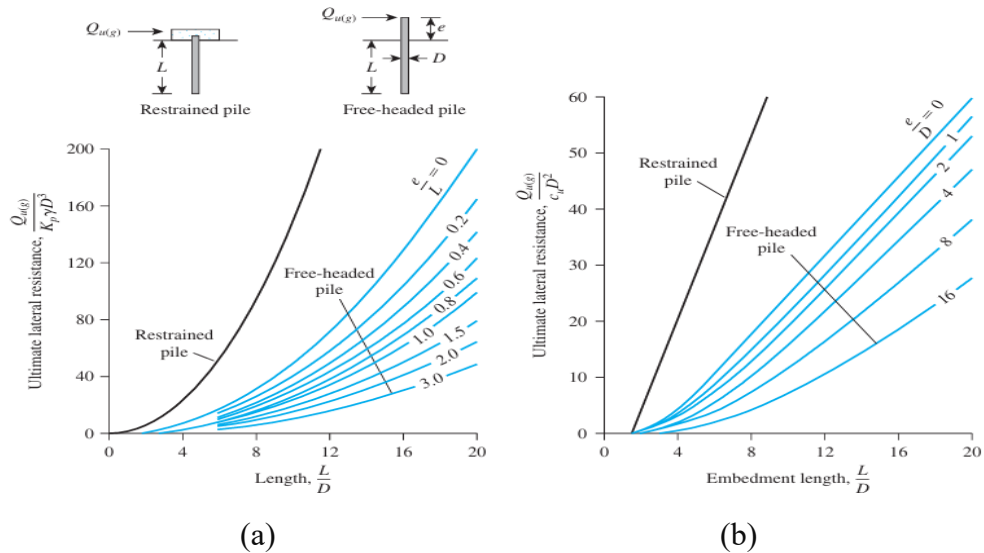
<i>Soil</i>	n_h	
	kNn/m^3	Llb/in^3
<i>Dry or moist sand</i>		
<i>Loose</i>	1800 – 2200	6,5 – 8,0
<i>Medium</i>	5500 – 7000	20 – 25
<i>Dense</i>	15000 – 18000	55 – 65
<i>Submerged sand</i>		
<i>Loose</i>	1000 – 1400	3,5 – 5,0
<i>Medium</i>	3500 – 4500	12 – 18
<i>Dense</i>	9000 – 12000	32 – 45

Tabel 2.18 Perkiraan Nilai n_h Tanah Lempung/*Clay*

Tanah	n_h (kNn/m^3)	Referensi
Lempung terkonsolidasi	166 – 3518	Reese & Matlock (1956)
normal lunak	277 – 554	Davisson & Prakash (1963)
	111 – 277	Peck Davisson (1970)

Tanah	nh (kNn/m ³)	Referensi
Lempung terkonsolidasi normal organik	111 – 831	Davisson (1970)
Gambut	55 27,7 – 111	Davisson (1970) Wilson & Hils (1967)
Loess	8033 - 11080	Bowles (1968)

1. Daya Dukung Lateral Tiang pendek (*Short Pile*)



Gambar 2.10 Tahanan Lateral Ultimit Tiang Pendek/*Short Pile*, (a) Tanah Pasir/*Sand* dan (b) Tanah Lempung/*Clay* – Metode Broms

Sehingga persamaan daya dukung lateral izin dengan sebagai berikut:

$$Q_g = \frac{Q_u}{FS} \quad (2.36)$$

Keterangan:

Q_g = daya dukung lateral izin

Q_u = daya dukung lateral

FS = faktor keamanan (2,5 berdasarkan SNI 8460:2017)

a. Tiang Pendek untuk Tanah Pasir ($\phi > 0$)

Hubungan dinyatakan dalam bentuk grafik Gambar 2.10 (a) Nilai sumbu X dengan persamaan sebagai berikut:

$$Length, \frac{L}{D} \quad (2.37)$$

Kemudian didapatkan nilai sumbu Y (plot grafik), maka persamaan untuk daya dukung ultimit lateral tiang pendek untuk tanah pasir sebagai berikut:

$$Q_u = (\text{plot grafik}) \times K_p \gamma D^3 \quad (2.38)$$

Keterangan:

Q_u = beban lateral (kN)

L = panjang tiang (m)

D = diameter tiang (m)

γ = berat isi tanah

K_p = nilai dari $\tan^2 \left(\frac{\phi'}{2} \right)$

b. Tiang Pendek untuk Tanah Pasir ($\phi = 0$)

Pada penentuan ini terdapat *embedded length* (panjang tertanam) guna menentukan panjang minimum tiang yang harus tertanam di tanah agar tiang tidak terguling atau mengalami perpindahan berlebih. *Embedded length* akan tergantung dari mana kegagalan terjadi terlebih dahulu, serta karakteristik tanah (tanah kohesif vs. non-kohesif). Kegagalan pada metode Broms terdapat dua konsisi yaitu:

1. Failure due to bending of the pile (kegagalan tiang)
2. Failure due to soil passive resistance (kegagalan tanah)

Hubungan dinyatakan dalam bentuk grafik Gambar 2.10 (b) Nilai sumbu X dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Embedment Length, } \frac{L}{D} \quad (2.39)$$

Kemudian didapatkan nilai sumbu Y (plot grafik), maka persamaan untuk daya dukung ultimit lateral tiang pendek untuk tanah lempung sebagai berikut:

$$Q_u = (\text{plot grafik}) \times c D^2 \quad (2.40)$$

Keterangan,

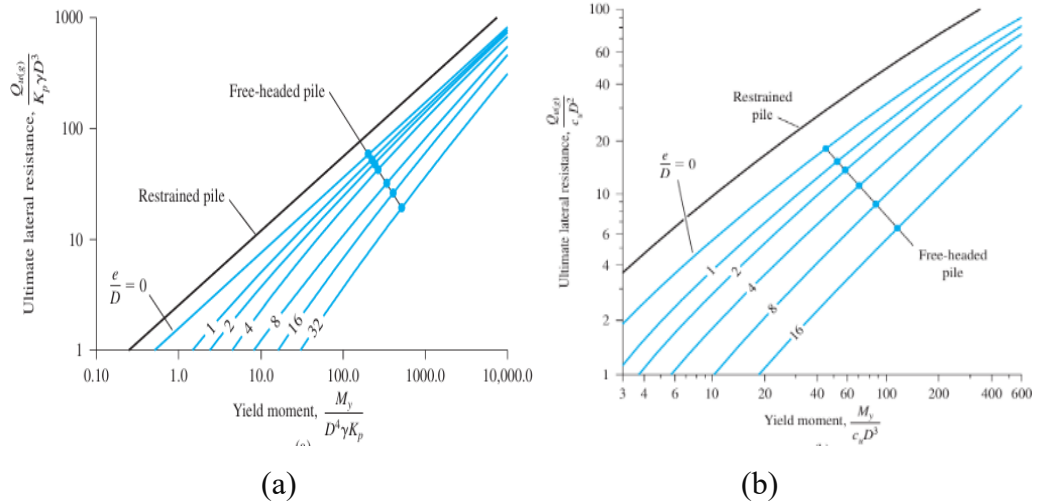
L = panjang tiang (m)

D = diameter tiang (m)

c = kohesi

2. Daya Dukung Lateral Tiang Panjang (*Long Pile*)

Yield moment atau momen leleh merupakan kapasitas lentur batas dari penampang tiang. Yield moment menjadi batas aman struktur tiang sebelum terjadi kegagalan lentur. Apabila momen akibat beban lateral melebihi yield moment maka tiang dianggap gagal secara struktural (lelah atau bengkok permanen).



Gambar 2.11 Tahanan Lateral Ultimit Tiang Panjang/*Long Pile*, (a) Tanah Pasir/*Sand* dan (b) Tanah Lempung/*Clay* – Metode Broms

$$M_y = SF_y \quad (2.41)$$

Keterangan,

M_y = *moment crack*

S = *section modulus of the pile section* $\left(\frac{I_p}{D/2}\right)$

F_y = mutu beton

Sehingga daya persamaan dukung lateral izin sebagai berikut:

$$Q_g = \frac{Q_u}{FS} \quad (2.42)$$

Keterangan:

Q_g = daya dukung lateral izin

Q_u = daya dukung lateral

FS = faktor keamanan (2,5 berdasarkan SNI 8460:2017)

a. Tiang Panjang untuk Tanah Pasir

Hubungan dinyatakan dalam bentuk grafik Gambar 2.11 (a). Nilai sumbu X dengan persamaan sebagai berikut:

$$Yield\ moment = \frac{My}{D^4 \gamma K_p} \quad (2.43)$$

Kemudian didapatkan nilai sumbu Y (plot grafik), maka persamaan untuk daya dukung ultimit lateral untuk tanah lempung sebagai berikut:

$$H_u = (\text{plot grafik}) \times K_p \gamma D^3 \quad (2.44)$$

Keterangan:

L = panjang tiang

D = diameter tiang

γ = berat isi tanah

K_p = nilai dari $\tan^2 \left(\frac{\phi'}{2} \right)$

b. Tiang Panjang untuk Tanah Lempung

Hubungan dinyatakan dalam bentuk grafik Gambar 2.11 (b). Nilai sumbu X dengan persamaan sebagai berikut:

$$Yield\ moment = \frac{My}{cD^2} \quad (2.45)$$

Kemudian didapatkan nilai sumbu Y (plot grafik), maka persamaan untuk daya dukung ultimit lateral untuk tanah lempung sebagai berikut:

$$H_u = (\text{plot grafik}) \times cD^2 \quad (2.46)$$

Keterangan:

Q_u = daya dukung lateral tiang panjang tanah pasir

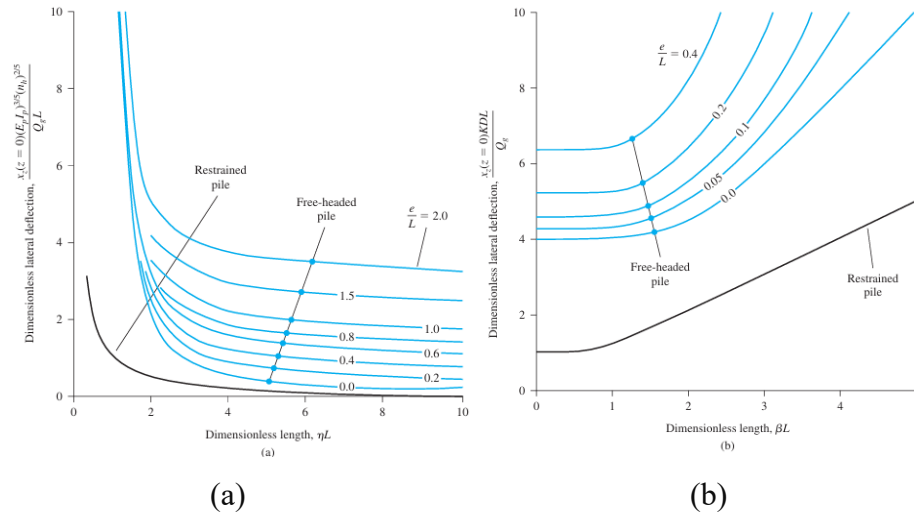
My = momen maksimum

D = diameter tiang

c = kohesi

3. Daya Dukung Lateral berdasarkan Defleksi (Pergeseran) fondasi Tiang Pancang

Defleksi lateral yang diizinkan berdasarkan SNI 8640:2017 pada fondasi tiang pancang bergantung pada kategori struktur dan risiko seismik. Defleksi lateral yang diizinkan sebesar ≤ 12 mm pada 100% dari beban dan ≤ 25 mm pada 200% dari beban. Batasan ini bertujuan untuk mencegah kerusakan struktural dan menjaga faktor keamanan bagi pengguna bangunan.



Gambar 2.12 Defleksi Pada Tiang Pancang (a) Tanah Pasir/*Sand* dan (b) Tanah Lempung/*Clay* – Metode Broms

a. Defleksi lateral untuk tanah pasir (*sand*) “ $\phi > 0$ ”

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{\eta h}{E_p \times I_p}} \quad (2.47)$$

Keterangan,

η_h = koefisien variasi modulus (Gambar 2.12)

E_p = modulus elastisitas tiang (kN/m^2)

I_p = momen inersia tiang (m^4)

Defleksi lateral tiang dapat dihitung berdasarkan perilaku tiang, dimensi tiang, dan bergantung dengan beban yang diterima. Hubungan di atas dinyatakan dalam bentuk grafik Gambar 2.12 (a). Nilai sumbu X telah diketahui kemudian didapat nilai sumbu Y. Maka persamaan untuk defleksi lateral untuk tanah pasir sebagai berikut:

$$Qg = \frac{x_z(z=0)(E_p I_p)^{3/5} (\eta h)^{2/5}}{\text{plot grafik sumbu Y} \times L} \quad (2.48)$$

Keterangan:

Qg = defleksi lateral

x_z = defleksi izin (m)

L = panjang tiang (m)

b. Defleksi lateral untuk tanah lempung (*clay*) “ $\phi = 0$ ”

$$K = \frac{\text{pressure}}{\text{displacement}} \quad (2.49)$$

Maka, β dapat didefinisikan dengan persamaan berikut:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K \times D}{4E_p \times I_p}} \quad (2.50)$$

Keterangan:

B = faktor tak berdimensi

K = modulus tanah horizontal (kN/m^3) Tabel 2.19 (Braja M.Das, 2016))

E_p = modulus elastisitas tiang (kN/m^2)

I_p = momen inersia tiang (m^4)

Tabel 2.19 Nilai K untuk tanah lempung

<i>Unconfined Compression Strength, q_u</i>		K	
kN/m^2	lb/in^2	kN/m^3	lb/in^3
200	≈ 30	10.000-20.000	37-75
200-800	30-120	20.000-40.000	75-150
> 800	>120	>40.000	>150

Defleksi lateral tiang dapat dihitung berdasarkan perilaku tiang, dimensi tiang, dan bergantung dengan beban yang diterima. Hubungan di atas dinyatakan dalam bentuk grafik Gambar 2.12 (b). Nilai sumbu X telah diketahui kemudian didapat nilai sumbu Y. Maka persamaan untuk defleksi lateral untuk tanah lempung sebagai berikut:

$$Q_g = \frac{x_z(z=0)KDL}{\text{Plot grafik sumbu Y}} \quad (2.51)$$

Keterangan:

Q_g = defleksi lateral

x_z = defleksi izin (m)

K = modulus elastisitas horizontal

D = diameter tiang (m)

L = panjang tiang (m)

2.7.3 Kapasitas Daya Dukung Tiang Tunggal dengan Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) merupakan suatu prosedur perhitungan yang dipakai untuk mendapat pendekatan lebih dalam dari

suatu permasalahan matematis pada rekayasa teknik dengan persamaan aljabar yang melibatkan nilai-nilai pada titik-titik diskrit bagian yang dievaluasi. FEM pada rekayasa geoteknik memiliki perbedaan tersendiri dibandingkan pada rekayasa struktur. Contohnya fondasi, analisis dengan FEM menggunakan kekakuan antara dua elemen, yaitu elemen struktur fondasi dan elemen tanah. Dalam menggunakan pada perangkat FEM, pengguna harus mengetahui konsep pemodelan yang akan dipilih. Sebelum melakukan perhitungan secara numerik, maka terlebih dahulu dibuat model dari fondasi tiang pancang yang akan dianalisis. Umumnya pemodelan geometrik pada FEM dapat dibagi tiga, yaitu:

1. *Axisymmetric*, pemodelan aksial dipakai pada struktur simetris, seperti balok.
2. *Strain*, pemodelan regangan umumnya dipakai untuk memodelkan struktur yang panjang seperti dinding penahan tanah (DPT) dan tanah serta saluran drainase.
3. *Plain Stress*, permukaan yang bisa dipakai untuk pemodelan portal.

Model material pada perangkat lunak dengan FEM didasarkan oleh persamaan matematika yang memberikan hubungan antara tegangan dan regangan. Perangkat lunak FEM menggunakan koordinat seperti yang digunakan di sebagian besar program. Menurut FEM, kontinum dibagi menjadi sejumlah elemen (volume). Setiap elemen terdiri dari beberapa simpul, setiap simpul memiliki derajat kebebasan yang sesuai dengan nilai diskrit dari yang tidak diketahui dalam masalah nilai batas. Pada teori deformasi (u) perlu menggunakan FEM yang didasarkan konsep "diskretisasi". Suatu massa atau daerah-daerah kecil yang disebut "*finite element*" atau elemen hingga. Rumus dasar FEM sebagai berikut.

$$K \times u = F \quad (2.52)$$

Keterangan:

K = matrik kekakuan terhadap deformasi

u = vektor perpindahan nodal

F = vektor gaya eksternal (beban konstruksi atau tekanan air pori)

Pada setiap elemen dalam model terdapat hubungan antara regangan dan perpindahan dapat dijelaskan pada persamaan berikut.

$$\varepsilon = B \times u \quad (2.53)$$

Keterangan:

ε = regangan

B = matriks bentuk (*strain-displacement matrix*)

u = deformasi

$$\sigma = D \times \varepsilon \quad (2.54)$$

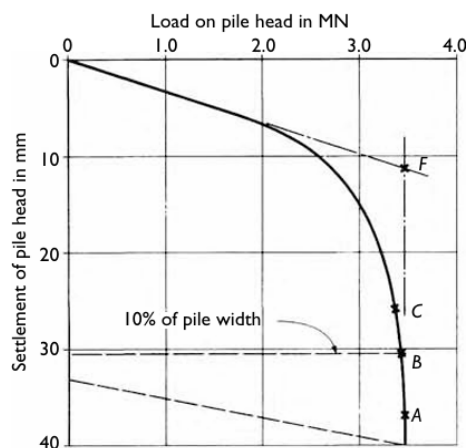
Keterangan:

D = matriks konstitutif material

2.8 Kapasitas Daya Dukung berdasarkan Hasil Uji Pembebanan Statik

Pengujian statik merupakan pengujian langsung terhadap tiang yang telah dipancang hingga mencapai kedalaman yang direncanakan. Uji pembebanan dilakukan dengan rentang beban mulai dari 0 hingga 3 kali beban rencana. Pengujian ini dapat diandalkan untuk memperoleh daya dukung fondasi tiang secara aktual di lapangan. Namun, uji statik tidak dapat menunjukkan respons tiang pada selimut dan ujungnya serta besaran daya dukung ultimit (Putra & Hidayat, 2014).

Terdapat beberapa metode analitis yang dapat digunakan untuk menentukan daya dukung ultimit berdasarkan hasil uji statik. Meskipun demikian, setiap metode menghasilkan nilai daya dukung ultimit yang berbeda, sehingga diperlukan evaluasi lebih lanjut untuk menentukan metode yang paling sesuai (Putra & Hidayat, 2014). Pada saat pengujian akan terjadi hubungan antara deformasi dan beban yang digambarkan dalam bentuk grafik, dapat dilihat pada Gambar 2.13 (M. Tomlinson & Woodward, 2008) di halaman berikutnya.



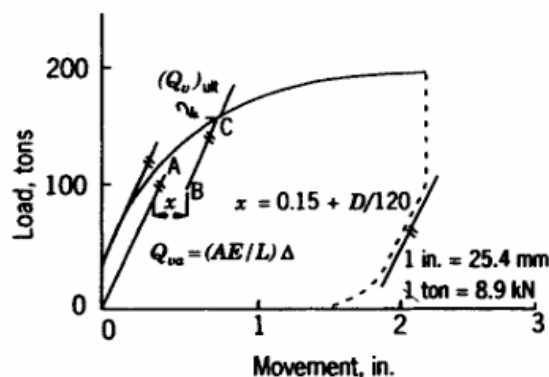
Gambar 2.13 Kurva Hubungan antara Beban dengan Penurunan dari Uji Beban Tiang

Metode menguji daya dukung tiang dengan memberikan beban statis yang meningkat secara bertahap. Beban diaplikasikan dengan menggunakan beban *dead weight* atau sistem *jack* hidrolik yang menekan tiang ke bawah, kemudian penurunan atau defleksi yang terjadi diukur. Hasil dari uji beban statis ini digunakan untuk menentukan daya dukung ultimit tiang serta nilai *settlement* (penurunan) dengan melakukan interpretasi menggunakan beberapa metode sebagai berikut:

2.8.1 Metode Davinsson (1972)

Prosedur penentuan beban ultimit dilakukan dengan tahap berikut:

- Plot kurva hubungan antara beban dan penurunan berdasarkan pengujian pembebanan
- Membuat kurva pendekatan untuk penurunan maksimum pada setiap siklus pembebanan
- Menghitung penurunan elastis pada beban rencana
- Menarik garis OA berdasarkan persamaan penurunan elastis
- Menarik garis BC yang sejajar dengan OA dengan jarak X
- Menentukan beban ultimit berdasarkan perpotongan garis BC dengan kurva beban-penurunan



Gambar 2.14 Kurva Hubungan Beban dan Penurunan Metode Davisson

Dari Gambar 2.14 (Prakash & D.Sharma, 2008) penurunan elastik dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\frac{S_e}{Q} = \frac{L}{A_p \times E_p} \quad (2.55)$$

Keterangan:

S_e = penurunan elastis

Q = beban uji yang diberikan

L = panjang tiang

A_p = luas penampang tiang

E_p = modulus elastisitas tiang

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

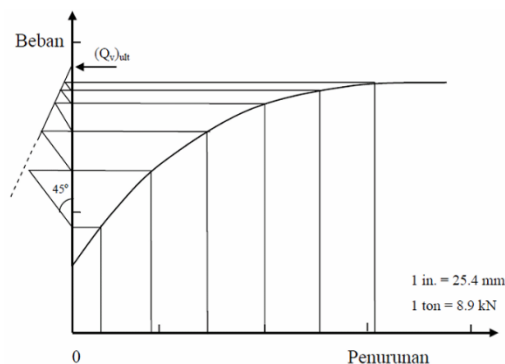
2.8.2 Metode Mazurkiewick (1972)

Prosedur penentuan beban ultimit dengan menggunakan metode ini yaitu menggambarkan kurva beban terhadap penurunan dilakukan dengan tahap berikut:

- Gambarkan kurva beban terhadap penurunan.
- Tentukan beberapa titik pada sumbu penurunan dengan interval penurunan yang sama.
- Tarik garis sejajar dengan sumbu beban dari beberapa titik penurunan yang telah ditentukan hingga memotong kurva, dan tarik garis sejajar sumbu penurunan hingga memotong sumbu beban.
- Dari perpotongan setiap beban tersebut, tarik garis yang membentuk sudut 45° terhadap garis perpotongan berikutnya, dan seterusnya.
- Tarik garis lurus yang mewakili titik-titik yang terbentuk. Perpotongan garis lurus ini dengan sumbu beban merupakan beban ultimit dari tiang.

Tahapan dilakukan pada

Gambar 2.15 (Prakash & D.Sharma, 2008) dengan cara plot garis.



Gambar 2.15 Kurva Hubungan Beban dan Penurunan Metode Mazurkiewick

2.8.3 Metode Chin (1971)

Prosedur penentuan beban ultimit metode chin dilakukan dengan tahap berikut:

- Gambarkan kurva antara rasio penurunan terhadap beban (s/Q) terhadap penurunan, Keterangan s adalah penurunan dan Q adalah beban seperti ditunjukkan pada gambar berikut
- Tarik garis lurus yang mewakili titik-titik yang telah digambarkan, dengan persamaan sebagai berikut

$$\frac{s}{Q} = c_1 \times s + c_2 \quad (2.56)$$

- Hitung c_1 dari persamaan garis atau dari kemiringan garis lurus yang telah ditentukan.
- Beban ultimit adalah $1/c_1$.

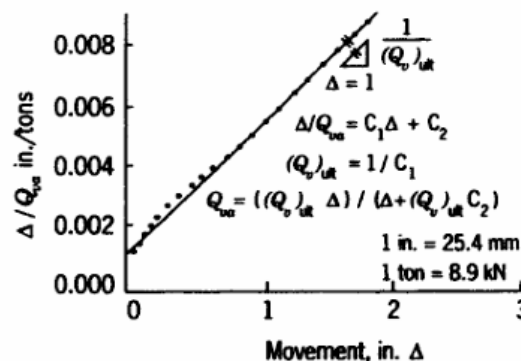
Keterangan:

S = penurunan

Q = penambahan beban

C_1 = kemiringan garis lurus

Tahapan dilakukan pada Gambar 2.16 (Prakash & D.Sharma, 2008) dengan cara plot garis.



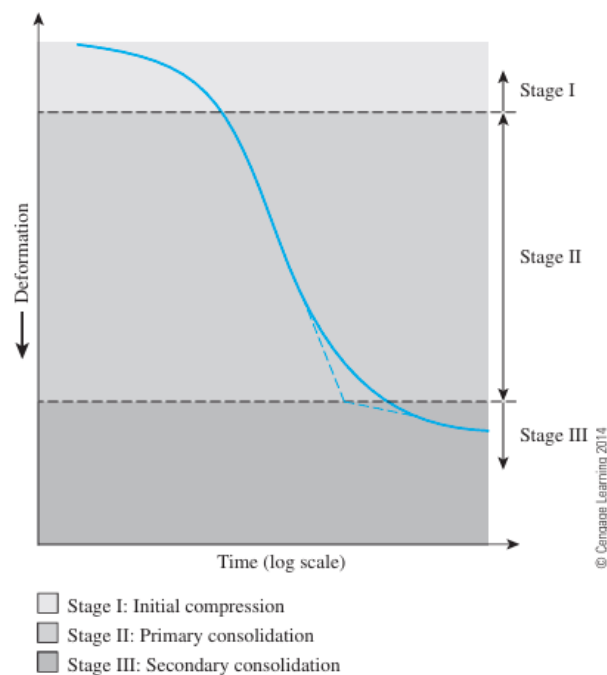
Gambar 2.16 Hubungan Beban dan Penurunan Metode Chin

2.9 Penurunan

Penurunan muka tanah (*land subsidence*) merupakan suatu proses gerakan penurunan muka tanah yang didasarkan atas suatu datum tertentu (kerangka referensi geodesi) di mana terdapat. Penurunan muka tanah ini diakibatkan oleh pembebanan di atas permukaan, hilangnya air tanah akibat eksploitasi berlebihan, gempa yang mengakibatkan rusaknya struktur tanah, dan ketidakstabilan bidang

tanah akibat proses tertentu. Penurunan muka tanah secara tidak langsung pemaksaan memadatkan struktur tanah. Umumnya terjadi pada daerah yang tadinya berupa rawa, delta, endapan banjir yang dialihkan fungsi tataguna lahannya tanpa melakukan rekayasa tanah terlebih dahulu (Braja M.Das, 2016).

Lapisan tanah yang diberikan beban di atasnya, maka partikel tanah akan mengalami penambahan tegangan, sehingga pada tanah terjadi penurunan (*settlement*). Penurunan tersebut disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah, dan keluarnya air atau udara dari dalam pori. Salah satu permasalahan pada pekerjaan konstruksi adalah penurunan tanah yang besar. Penurunan yang besar tersebut disebabkan oleh penurunan konsolidasi pada tanah ketika dibebani (Braja M.Das, 2016).



Gambar 2.17 Hubungan Waktu Deformasi dengan Konsolidasi

Dari Gambar 2.17 (Braja M.Das, 2016) dapat dilihat bahwa ada 3 tahapan yang berbeda pada proses konsolidasi berikut penjelasannya:

Tahap I : Penurunan awal (*initial compression*), di mana terjadi penurunan dengan segera sesudah beban bekerja, penurunan ini terjadi akibat proses penekanan udara dari dalam pori tanah.

Tahap II : konsolidasi primer (*primary consolidation*), yaitu periode selama tegangan air pori secara lambat laun dipindahkan ke dalam tegangan efektif, sebagai akibat dari keluarnya air pori-pori tanah.

Tahap III : konsolidasi sekunder (*secondary consolidation*), yaitu terjadi setelah tegangan air pori hilang seluruhnya. Penurunan yang terjadi adalah disebabkan oleh penyesuaian yang bersifat plastis dari butir-butir tanah yang terkonsolidasi primer.

Besaran total penurunan fondasi dapat dilihat menggunakan persamaan berikut:

$$S_T = S_e + S_c + S_s \quad (2.57)$$

Keterangan:

S_T = total penurunan (m)

S_e = penurunan seketika (m)

S_c = penurunan konsolidasi primer (m)

S_s = penurunan konsolidasi sekunder (m)

2.9.1 Penurunan Seketika pada Tiang Tunggal

Penurunan elastis atau *elastic settlement* adalah deformasi vertikal tanah akibat beban yang bekerja, yang terjadi dalam waktu singkat setelah adanya beban. Penurunan ini terjadi pada tanah berbutir kasar (pasir, kerikil) atau tanah berbutir halus yang tidak jenuh dan dapat dihitung berdasarkan teori elastisitas. Penurunan pada fondasi tiang tunggal menggunakan persamaan Vesic 1970 sebagai berikut :

$$S_e = S_{e(1)} + S_{e(2)} + S_{e(3)} \quad (2.58)$$

Keterangan:

S_e = penurunan elastik total fondasi tiang tunggal

$S_{e(1)}$ = penurunan elastik akibat deformasi material tiang

$S_{e(2)}$ = penurunan akibat beban di ujung tiang

$S_{e(3)}$ = penurunan akibat beban di selimut tiang

Persamaan perhitungan penurunan elastik tiang

$$S_{e(1)} = \frac{(Q_p + (\alpha \times Q_s)) \times L}{A_p \times E_p} \quad (2.59)$$

Keterangan:

Q_p = beban yang didukung ujung tiang

Q_s = beban yang didukung selimut tiang

L = panjang tiang

A_p = luas penampang tiang

E_p = modulus elastisitas tiang

α = koefisien yang bergantung pada distribusi gesekan selimut sepanjang tiang. 0,5 dan 0,67 untuk distribusi gesekan seragam atau parabolik sepanjang tiang sedangkan untuk distribusi berbentuk segitiga nilai $\alpha = 0,33$.

$$Se_{(2)} = \frac{C_p \times Q_p}{D \times q_p} \quad (2.60)$$

Keterangan:

C_p = koefisien empiris dapat dilihat Tabel 2.20 (Braja M.Das, 2016)

Q_p = beban yang didukung ujung tiang

D = diameter tiang

q_p = tahanan ujung tiang = Q_p/A_p

Tabel 2.20 Nilai Koefisien C_p

Jenis Tanah	Tiang Pancang	Tiang Bor
Pasir (padat hingga lepas)	0,02 – 0,04	0,09 – 0,18
Lempung (teguh hingga lunak)	0,02 – 0,03	0,03 – 0,06
Lanau (padat hingga lepas)	0,03 – 0,05	0,09 – 0,12

$$Se_{(3)} = \frac{C_s \times Q_s}{L \times q_p} \quad (2.61)$$

$$C_s = \left(0,93 + 0,16 \sqrt{\frac{L}{D}} \right) C_p \quad (2.62)$$

Keterangan:

C_s = koefisien

Q_s = beban yang didukung selimut tiang

L = panjang tiang

q_p = tahanan ujung tiang = Q_p/A_p

2.9.2 Penurunan Konsolidasi

Penurunan konsolidasi merupakan penurunan saat butiran tanah mengalami kompresi akibat beban pada jangka waktu tertentu yang diakibatkan disipasi air pori dalam lapisan tanah. Penurunan konsolidasi terjadi pada kondisi tanah berbutir

halus di bawah muka air tanah, penurunan konsolidasi terjadi dengan jangka waktu yang cukup lama tergantung kondisi tanah.

1. Penurunan Konsolidasi Primer

Penurunan Konsolidasi terjadi pada saat tanah berbutir halus yang terletak di bawah muka air tanah. Pada saat penurunan konsolidasi primer dipengaruhi oleh kecepatan aliran air yang meninggalkan rongga pori tanah akibat adanya tambahan tekanan. Proses konsolidasi primer sangat dipengaruhi oleh sifat tanah (permeabilitas, kompreibilitas, angka pori, bentuk geometri tanah termasuk tebal lapisan mampat, pengembangan arah horizontal dari zona mampat, dan batas lapisan lolos air, di mana air keluar menuju lapisan yang lolos air). Penurunan akibat konsolidasi tanah dasar dapat menggunakan persamaan berikut:

Tanah lempung *normally consolidated* (NC)

$$S_c = \frac{C_c \times H}{1 + e_0} \times \log \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'}{\sigma'_o} \quad (2.63)$$

Tanah lempung *overconsolidation* (OC):

Bila $\sigma'_o + \Delta\sigma' \leq \sigma'_c$

$$S_c = \frac{C_s \times H}{1 + e_0} \times \log \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'}{\sigma'_o} \quad (2.64)$$

Bila $\sigma'_o + \Delta\sigma' > \sigma'_c$

$$S_c = \frac{C_s \times H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} + \frac{C_c \times H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'}{\sigma'_c} \right) \quad (2.65)$$

Keterangan:

C_c = indeks kompresi

C_s = indeks kembang

H = tebal lapisan yang terkonsolidasi (m)

e_0 = angka pori

σ'_o = tegangan vertikal efektif (kN/m²)

σ'_c = tegangan konsolidasi efektif dimasa lampau (kN/m²)

$\Delta\sigma$ = penambahan beban vertikal titik yang ditinjau di tengah-tengah lapisan akibat penambahan beban

2. Penurunan Konsolidasi Sekunder

Penurunan konsolidasi primer dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$S_c = C'_\alpha H \times \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (2.66)$$

Dengan,

$$C'_\alpha = \frac{C_\alpha}{1 + e_p} \quad (2.67)$$

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{\Delta e}{\log(t_2 / t_1)} \quad (2.68)$$

Keterangan :

C_α = indeks kompresi sekunder

Δe = perubahan angka pori

e_p = angka pori pada akhir konsolidasi primer

H = tebal lapisan tanah lempung

t_2, t_1 = waktu

2.9.3 Penurunan yang Diizinkan

Permukiman yang diperbolehkan pada suatu bangunan dipengaruhi oleh sejumlah variabel. Unsur-unsur tersebut meliputi jenis, tinggi, dan tujuan bangunan, serta jumlah, kecepatan, dan penyebaran penurunan. Jika penurunan terjadi secara bertahap, ada kemungkinan struktur dapat menyesuaikan diri tanpa mengalami kerusakan struktural akibat rangkai. Akibatnya, ada persyaratan yang berbeda untuk menurunkan fondasi pada tanah berpasir dan tanah liat. Kondisi rasio penurunan yang aman dapat dilihat pada persamaan sebagai berikut:

$$S_T \leq S_{izin} \quad (2.69)$$

Keterangan:

$$S_{izin} = 15 \text{ cm} + B/600$$

Beda penurunan (*differential settlement*) yang diperkirakan akan terjadi harus ditentukan secara saksama dan konservatif, serta pengaruhnya terhadap bangunan gedung tinggi di atasnya harus dicek untuk menjamin bahwa beda penurunan tersebut masih memenuhi kriteria kekuatan dan kemampuan layan sebesar 1/300.