

2 LANDASAN TEORI

2.1 Pembebanan

Beban yang ditahan oleh fondasi merupakan beban keseluruhan bangunan yang ada di atasnya dan beban fondasinya sendiri. Beban maksimum yang bekerja pada fondasi adalah penjumlahan dari beban mati, beban hidup, beban angin, dan beban gempa serta *imposed load* yang disebabkan antara lain oleh gaya *buoyancy* dan tekanan tanah. Beban yang bekerja bersifat permanen ataupun sementara. Seluruh beban yang disebutkan di atas harus ditransfer ke tanah melalui fondasi (Badan Standardisasi Nasional, 2017).

Kombinasi pembebanan dan faktor beban digunakan pada kasus-kasus dimana beban terfaktor dan kombinasi pembebanan diatur secara spesifik pada standar perencanaan yang sesuai (Badan Standardisasi Nasional, 2013).

2.1.1 Beban yang bekerja

2.1.1.1 Beban Mati (*Dead Load*)

Beban mati merupakan beban struktur sendiri dan beban benda yang berada tetap pada posisinya selama struktur berdiri. Beban yang bekerja adalah akibat gravitasi secara terus menerus pada lokasi struktur. Perencanaan struktur di bawah tanah juga harus memerhatikan tekanan lateral tanah di sampingnya (Badan Standardisasi Nasional, 2013). Beban mati pada tangki solar adalah berat tangki itu sendiri dan komponennya seperti bagian bawah dan atap tangki. Penentuan beban mati dapat menggunakan persamaan (2.1).

$$DL_{total}=DLS+DLB+DLR \quad (2.1)$$

1. Beban Pelat dinding

Beban pelat dinding merupakan beban dari material dinding tangki. Perhitungan beban pelat dinding dapat menggunakan persamaan (2.2).

$$DLS=\gamma_{steel} \times V \quad (2.2)$$

$$V=t_d \times L_s \times B_s \times n_s \quad (2.3)$$

Dimana:

V : Volume dinding tangki (m^3)

t_d : Tebal pelat dinding (mm)

L_s : Panjang pelat (m)

B_s : Lebar pelat (m)

n_s : Jumlah pelat

2. Beban Lantai

Lantai pada tangki bahan bakar solar menggunakan material baja. Sehingga beban lantai dapat dihitung dengan persamaan (2.4).

$$DLB = \gamma_{\text{steel}} \times V \quad (2.4)$$

$$V = \frac{1}{4} \times \pi \times D_b^2 \times t_b \quad (2.5)$$

Dimana:

D_b : Diameter luar lantai (m)

t_b : Tebal pelat lantai (mm)

3. Beban Atap

Beban atap berasal dari beban material yang digunakan sebagai atap pada tangki bahan bakar solar. Perhitungan beban atap dapat menggunakan persamaan (2.6).

$$DLR = \gamma_{\text{steel}} \times V \quad (2.6)$$

$$V = \frac{1}{2} \times \pi \times D \times \left(\frac{\frac{1}{2}D}{\cos\theta} \right) \times t_r \quad (2.7)$$

Pada beban atap t_r merupakan tebal dari material atap yang dipakai untuk tangki solar tersebut.

2.1.1.2 Beban Hidup (*Live Load*)

Beban hidup adalah beban akibat adanya pengguna bangunan serta barang-barang yang dapat berpindah yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan. Beban hidup berupa beban atap yang berasal dari beban pekerja dan peralatan, serta beban fluida yang berupa solar pada tangki. Beban atap minimum pada tangki solar adalah 1,0 kPa sesuai dengan aturan pada (ASCE, 2022).

Beban hidup pada atap dapat dihitung menggunakan persamaan (2.8) dengan L_{rp} adalah tekanan pada atap. Sedangkan, persamaan (2.9) dapat dipakai dalam menentukan besaran beban fluida.

$$L_r = L_{rp} \times AH \quad (2.8)$$

$$F = V_{maks} \times \rho_{air} \quad (2.9)$$

2.1.1.3 Beban Angin (*Wind Load on Tanks/Overtuning Stability*)

Beban angin adalah beban yang diakibatkan dari selisih tekanan udara. Beban yang termasuk dalam beban angin adalah seluruh beban yang ada pada gedung atau bagian gedung (Badan Standardisasi Nasional, 2013). Tekanan angin minimum rencana untuk bidang vertikal pada permukaan silinder sebesar 0,86 kPa. Sedangkan tekanan gaya angkat angin rencana horizontal adalah 1.44 kPa yaitu pada atap dengan permukaan lengkung ganda atau kerucut (API Std 650, 2020). Data kecepatan angin didapatkan dari website Badan Pusat Statistik Provinsi Kalimantan Timur. Perhitungan beban angin dapat menggunakan persamaan (2.10).

$$W = F_v = P_v \times A_v \quad (2.10)$$

$$P_v = 0,86 \times (V/190)^2 \quad (2.11)$$

$$A_v = 0,5 \times \pi \times D \times H \quad (2.12)$$

Dimana:

F_v : Beban angin (kN)

P_v : Tekanan angin rencana (kPa)

A_v : Luas vertikal bidang silinder (m²)

V : Kecepatan angin rencana (km/jam)

2.1.1.4 Beban Gempa (*Seismic Load*)

Gempa rencana memiliki persentase kemungkinan terlampaui sebesar 2%. Persentase ini berlaku pada bangunan gedung dan non-gedung dengan umur rencana 50 tahun. Pada beberapa jenis risiko struktur bangunan gedung dan non-

gedung, dampak gempa rencana harus memperhitungkan faktor keutamaan gempa seperti pada SNI 1726:2012.

Karakteristik gempa, tanah, juga bangunan dapat mempengaruhi analisis beban gempa. Parameter dasar yang harus ditentukan dalam perhitungan beban gempa adalah:

1. Kriteria desain seismik didapat dengan mengklasifikasikan tanah berdasarkan faktor amplikasi tanah pada bangunan (Mutiarasella, 2022). Tabel 2.1 menunjukkan klasifikasi pada profil tanah.

Tabel 2.1 Klasifikasi Profil Tanah

Kelas Situs	V_s (m/det)	N atau N_a	S_u (kPa)
SA (Batuan keras)	> 1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	> 50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 - 50	50 – 100
SE (tanah lunak)	< 175	< 15	< 50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah karakteristik sebagai berikut: <ol style="list-style-type: none"> 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$ 2. Kadar air, $w \geq 40\%$ 3. Kuat geser nisalir $S_u < 25$ kPa 		
SF (tanah khusus, investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik situs diperlukan pada jenis tanah ini)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu lebih dari karakteristik berikut: <ol style="list-style-type: none"> 1. Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibatn beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitive, tanah tersementasi lemah. 2. Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m). 		

Kelas Situs	V_s (m/det)	N atau N_a	S_u (kPa)
	3. Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ dengan Indeks Plastisitas $PI > 75$). 4. Lapisan lempung lunak/setengah teguh denganketebalan $H > 35$ m dengan $S_u < 50$ kPa.		

Tabel 2.2 Kriteria Perencanaan Gempa Berdasarkan Fungsi Infrastruktur

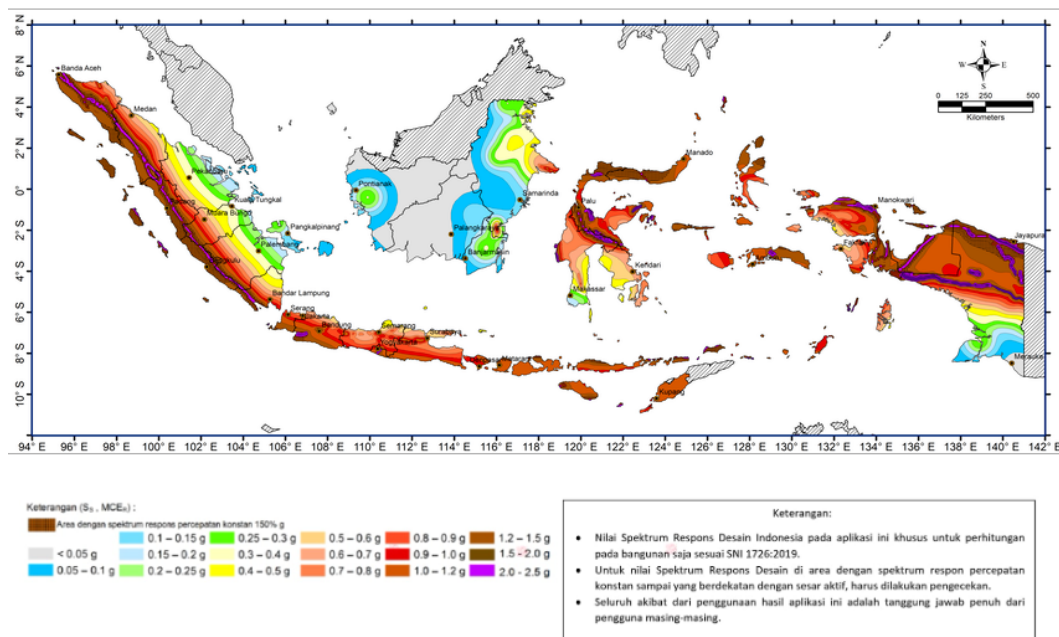
Peruntukan	Umur Rencana (tahun)	Probabilitas terlampaui (%)	Periode ulang (tahun)	Kriteria Keamanan	Referensi
Bangunan gedung dan non-gedung	50	2	2.500	-	SNI 1726:2012
Jembatan konvensional	75	7	1.000	-	SNI 2833:201x AASHTO (2012)
Dinding penahan Abutmen Jembatan	75	7	1.000	FK > 1,5 (terhadap geser saat mengalami beban statik) FK > 2 (terhadap guling saat mengalami beban statik) FK > 1,1 (terhadap beban pseudostatik)	WSDOT, FHWA-NJ-2005-002
Timbunan oprit				FK > 1,1	
Bendungan	100	1	10.000, <i>Safety Evaluation Earthquake</i> (SEE)	<ul style="list-style-type: none"> Tidak terjadi aliran air yang tidak terkendali Deformasi tidak melebihi 0,5 dari tinggi jagaan Deformasi pada filter tidak boleh melebihi 0,5 tebal filter Spilway tetap berfungsi setelah terjadi gempa rencana 	ICOLD No 148, 2016,
	100	50	145 <i>Operating Basis Earthquake</i> (OBE)	Kerusakan minor setelah terjadi gempa rencana	

Peruntukan	Umur Rencana (tahun)	Probabilitas terlampaui (%)	Periode ulang (tahun)	Kriteria Keamanan	Referensi
Bangunan pelengkap bendungan	50	2	2.500	-	
Terowongan	100	10	1.000		

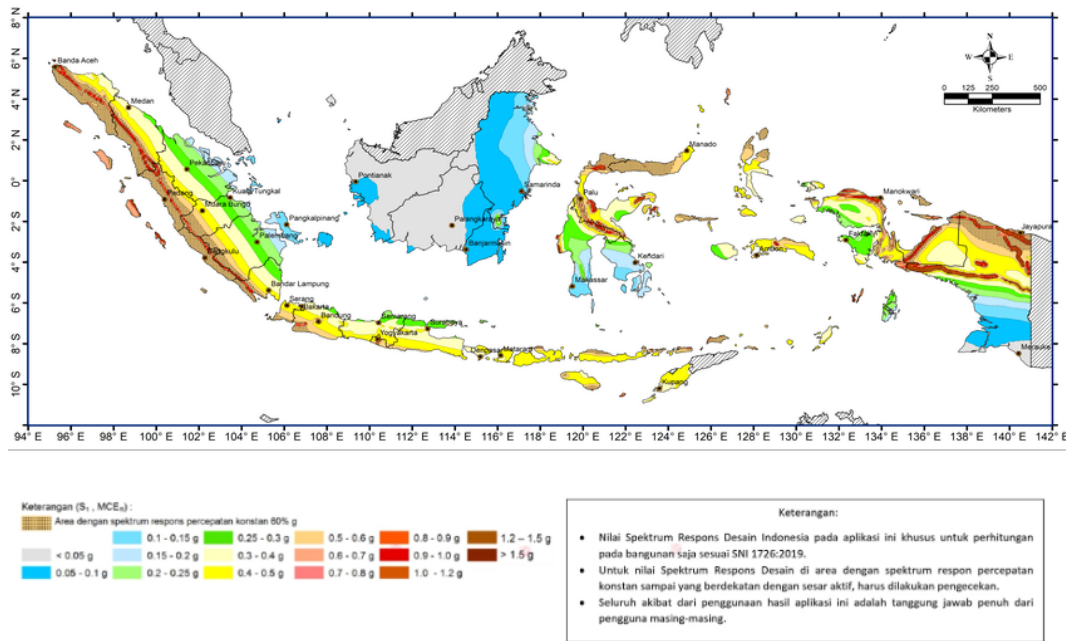
Perencanaan gempa juga harus didasarkan pada peruntukan bangunan, karena setiap bangunan memiliki umur rencana yang berbeda sehingga periode ulang gempanya juga akan berbeda. Tabel 2.2 menunjukkan kriteria perencanaan gempa berdasarkan peruntukan infrastruktur.

2. Data S_s , S_1 dan TL

Besar nilai S_s dan S_1 dipengaruhi oleh klasifikasi tanah pada lokasi yang ditinjau. Data S_s , S_1 dan TL didapatkan dari peta Respon Spektrum.



Gambar 2.1 Peta Respon Spektrum Percepatan 0.2s (S_s) untuk Probabilitas Terlampaui 2% dalam 50 Tahun



Gambar 2.2 Peta Respon Spektrum Percepatan 1.0s (S1) untuk Probabilitas Terlampaui 2% dalam 50 Tahun

3. Periode Struktur Bangunan (T)

- Waktu getar struktur (T)

Persamaan (2.13) digunakan untuk menghitung waktu getar struktur untuk rangka beton.

$$T_a = 0,0466 \times H^{0.9} \quad (2.13)$$

- Kategori risiko dan faktor keutamaan (I) struktur bangunan

Beberapa bagian resiko struktur pada bangunan gedung dan non gedung, dampak gempa rencana harus memperhitungkan faktor keutamaan gempa (I) (Sni 1726:2019). Tabel 2.3 menunjukkan faktor keutamaan gempa.

Tabel 2.3 Faktor Keutamaan Gempa

No	Kategori Resiko	Faktor Keutamaan Gempa, I
1	I	1,0
2	II	1,25
3	III	1,50

Data respon spektrum gempa merupakan data yang didapat dari website rsa.ciptakarya.pu.go.id berupa nilai p_g . Selain dari nilai p_g , beban gempa juga dipengaruhi oleh besar beban struktur seperti pada persamaan (2.14).

$$E = \sqrt{V_i^2 + V_c^2} \quad (2.14)$$

Dengan:

$$V_i = A_i \times (W_s + W_r + W_f + W_i) \quad (2.15)$$

$$V_c = A_c \times W_c \quad (2.16)$$

Dimana:

W_s : Beban mati pelat dinding (kN)

W_r : Beban mati atap (kN)

W_f : Beban mati lantai (kN)

Parameter A_c merupakan percepatan spektrum yang dapat dihitung dengan persamaan (2.17).

$$A_c = A_i = \left[0,625 S_p \times \left(\frac{I}{RW_i} \right) \right] \geq \left[0,5 S_1 \times \left(\frac{I}{RW_i} \right) \right] \quad (2.17)$$

Nilai A_i yang dipakai yaitu hasil terbesar dari perhitungan menggunakan persamaan diatas. S_p berdasarkan aturan metode ASCE adalah 0,203 g. Sedangkan parameter S_1 dari hasil pada website rsa.ciptakarya.pu.go.id sesuai dengan Lokasi yang ditinjau. Pada bangunan tangki pengelompokkan beban gempa sesuai dengan Tabel 2.3.

Faktor respon modifikasi (RW_i) untuk tangki harus dirancang dengan nilai sesuai yang ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Faktor Respon Modifikasi

No.	<i>Anchorage System</i>	RW_i (<i>Impulsive</i>)	RW_c (<i>convective</i>)
1	<i>Self-anchored</i>	3,5	2
2	<i>Mechanically-anchored</i>	4	2

Perhitungan beban gempa membutuhkan parameter berat efektif fluida (W_i) dimana untuk tangki dengan $\frac{D}{H} > 1,33$ persamaan (2.18) yang dipakai. Sedangkan untuk tangki dengan $\frac{D}{H} < 1,33$ dihitung dengan persamaan (2.19). Nilai W_p yaitu beban fluida pada tangki.

$$W_i = \frac{\tanh\left(0,866 \frac{D}{H}\right)}{\left(0,866 \frac{D}{H}\right)} \times W_p \quad (2.18)$$

$$W_i = \left[1,0 - 0,218 \frac{D}{H}\right] \times W_p \quad (2.19)$$

$$W_c = 0,230 \frac{D}{H} \tanh\left(\frac{3,67D}{H}\right) \times W_p \quad (2.20)$$

2.1.1.5 Internal Pressure Load

Internal pressure load merupakan beban tekanan internal yang ada pada tangki solar. Pada tangki solar besar beban tekanan internal paling besar tidak boleh lebih dari 18 kPa. Persamaan (2.21) dipakai untuk menentukan beban tekanan internal pada tangki.

$$P_i = P \times AH \quad (2.21)$$

Dimana:

P_i : Beban akibat tekanan internal

P : Tekanan internal rencana

Tekanan internal pada tangki bahan bakar solar terbagi menjadi dua jenis tekanan, yaitu:

a. Tekanan Desain

Tekanan desain merupakan tekanan fluida atau lainnya yang digunakan pada saat merencanakan tangki.

b. Tekanan Operasi

Tekanan operasi adalah besaran tekanan yang dapat diterima oleh tangki pada proses operasi.

2.1.1.6 External Pressure Load

External pressure load adalah beban yang berasal dari luar tangki dan menjadi dipertimbangkan pada perencanaan tangki. Tekanan eksternal desain berupa beban hujan dengan besaran minimum 0,25 kP. Perhitungan beban eksternal dapat menggunakan persamaan (2.22).

$$P_e = R \times A H \quad (2.22)$$

2.1.2 Faktor beban dan Kombinasi

Kombinasi pembebanan yang bekerja berdasarkan API 650 yaitu aturan mengenai bangunan tangki penyimpanan minyak. Kombinasi bebannya seperti pada Tabel 2.5 dibawah.

Tabel 2.5 Kombinasi Pembebanan

No	Jenis Kombinasi	Kombinasi Beban
1	<i>Fluid + Internal Pressure</i>	$L_1 = D_L + F + P_i$
2	<i>Hydrostatic Test</i>	$L_2 = D_L + (H_t + P_t)$
3	<i>Wind + Internal Pressure</i>	$L_2 = D_L + W + 0,4P_i$
4	<i>Wind + Eksternal Pressure</i>	$L_3 = D_L + W + 0,4P_e$
5	<i>Gravity Load</i>	$L_4 = D_L + L_r + 0,4P_e$ $L_4 = D_L + P_e + 0,4(L_r)$
6	<i>Seismic</i>	$L_5 = D_L + F + E + 0.1S_b + 0.4P_i$

Tekanan internal memiliki faktor kombinasi minimum sebesar 0,4 sebagai rasio tekanan internal operasi normal terhadap tekanan internal rencana. Faktor kombinasi minimum 0,4 juga digunakan untuk rasio tekanan eksternal operasi normal terhadap tekanan eksternal.

2.2 Tanah

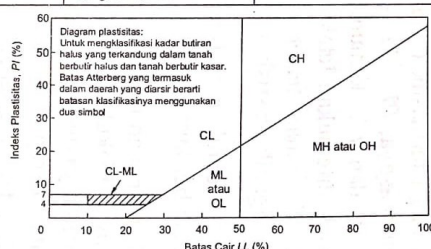
2.2.1 Tinjauan Umum

Pada bidang Teknik sipil, tanah merupakan campuran dari bahan organik, endapan lepas (*loose*), dan mineral yang berada di atas batuan dasar (*bedrock*). Jenis

tanah dibedakan dengan menggunakan istilah seperti pasir, lempung, lanau atau lumpur (Hardiyatmo, Christady, 2017). Sebuah bangunan pada umumnya akan dibuat di atas tanah, bahkan dengan teknologi sekarang bangunan dapat dibuat di bawah permukaan tanah. Oleh karena itu, sistem fondasi yang mendistribusikan beban dari bangunan ke tanah sangatlah penting.

2.2.2 Klasifikasi Jenis Tanah

Klasifikasi tanah sangat berguna sebagai data empiris pada perancangan konstruksi. Sebelum dilakukan klasifikasi tanah, maka harus diketahui kondisi geologi pada daerah tersebut untuk mengetahui bagaimana jenis sebaran batuan dan sifat keteknikannya (Irawan & Handiman, 2016). Umumnya klasifikasi tanah didasarkan pada ukuran partikel yang ditentukan melalui analisis saringan (uji sedimentasi) dan uji plastisitas. Pada saat menentukan klasifikasi tanah sistem yang umum digunakan adalah *Unified Soil Classification System* dan *AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)* (Hardiyatmo, Christady, 2017).

Divisi Utama		Simbol Kelompok	Nama Jenis		Kriteria laboratorium	
Tanah berbutir kasar 50% atau lebih tertahan saringan no. 200 (0,075 mm)	Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar tertahan saringan no. 4 (4,75 mm)	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir - kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria untuk GW Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$	
		Kerikil banyak kandungan butiran halus	GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir - kerikil, atau tidak mengandung butiran halus		Bila batas Atterberg berada di daerah asir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol
		Kerikil banyak kandungan butiran halus	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil pasir-lempung		
			GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil pasir-lempung		
	Pasir lebih dari 50 %	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	SW	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria untuk SW Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$	
		Kerikil banyak kandungan butiran halus	SP	Pasir gradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus		Bila batas Atterberg berada di daerah asir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol
			SM	Pasir berlanau, campuran pasir - lanau		
			SC	Pasir berlempung, campuran pasir - lempung		
Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0,075 mm)	Lanau dan lempung batas cair 50 % atau kurang	ML	Lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau berlempung	<div>Klasifikasi berdasarkan prosentase butiran halus, kurang dari 5% lolos saringan no. 200 : GW, GP, SW, SP. Lebih dari 12% lolos saringan no.200 : GM, GC, SM, SC. 5% - 12% lolos saringan no. 200 : Batasan klasifikasi yang mempunyai simbol doblel</div> <div>Diagram plastisitas: Untuk mengklasifikasi kadar butiran halus yang terkandung dalam tanah berbutir halus dan tanah berbutir kasar. Batas Atterberg yang termasuk dalam daerah yang diarsir berarti batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol</div> 		
					CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus ("lean clays")
		OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah			
			MH		Lanau tak organik atau pasir halus diatomae, lanau elastis	
	Lanau dan lempung batas cair > 50 %	CH	Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk ("fat clays")			
		OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi			
		Tanah dengan kadar organik tinggi	Pt		Gambut ("peat") dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi	

Gambar 2.3 Sistem Klasifikasi Tanah USCS

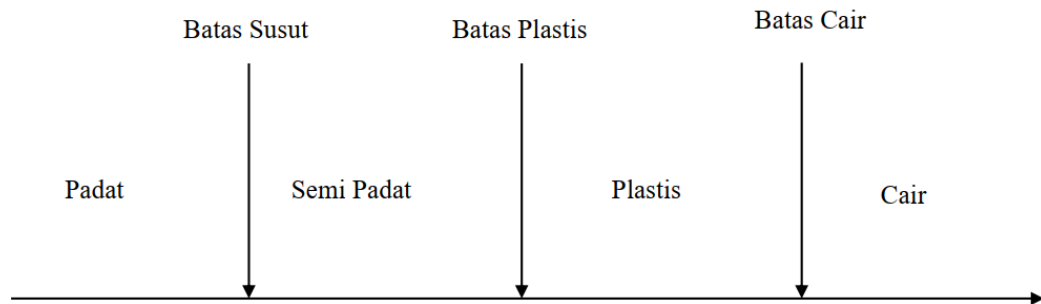
Pada Sistem *Unified*, tanah yang lolos saringan 200 kurang dari 50% disebut tanah kasar (kerikil dan pasir), sedangkan jika sebaliknya disebut tanah berbutir

halus (lanau/lempung). Tanah dibedakan dengan sejumlah kelompok dan subkelompok. Simbol yang dipakai untuk klasifikasi tanah diantaranya:

- G : Kerikil (*gravel*)
- S : Pasir (*sand*)
- C : Lempung (*clay*)
- M : Lanau (*silt*)
- O : Lanau atau lempung organik (*organic silt or clay*)
- Pt : Tanah gambut dan tanah organik tinggi (*peat and highly organic soil*)
- W : Gradasi baik (*well-graded*)
- P : Gradasi buruk (*poorly-graded*)
- H : Plastisitas Tinggi (*high-plasticity*)
- L : Plastisitas rendah (*low-plasticity*)

2.2.3 Batas-batas Atterberg

Hal penting yang perlu ditinjau mengenai tanah berbutir halus adalah plastisitasnya. Plastisitas diakibatkan oleh partikel mineral lempung pada tanah. Plastisitas adalah kemampuan tanah beradaptasi terhadap perubahan bentuk tanpa retak pada volume tertentu. Kadar air pada tanah menentukan bentuk tanah cair, plastis, semi padat, atau padat. Suatu cara untuk menggambarkan batas konsistensi tanah berbutir halus dengan memperhatikan kadar air tanah. Batas-batas tersebut disebut batas *Atterberg* yang terdiri dari *liquid limit* (batas cair), *plastic limit* (batas plastis), dan *shrinkage limit* (batas susut) disajikan pada Gambar 2.4 (Hardiyatmo, Christady, 2017).

Gambar 2.4 Batas-Batas *Atterberg*

1. Batas Cair

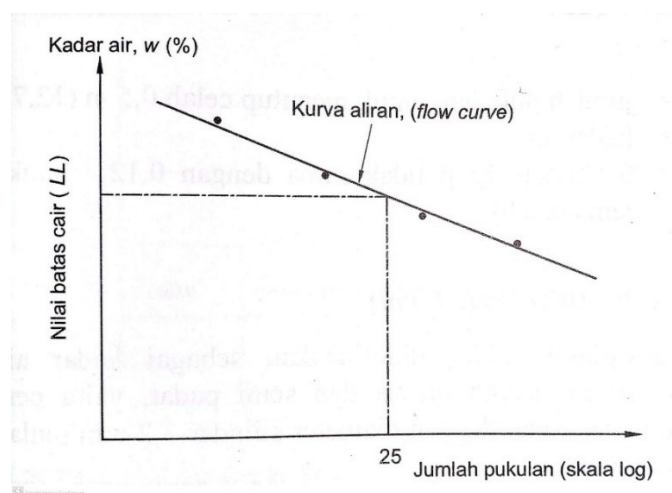
Batas cair (LL) merupakan batas keadaan cair dan plastis kadar air tanah (batas atas plastis). Pengujian untuk menentukan batas cair umumnya menggunakan uji Casagrande. Sedangkan untuk penggambaran hubungan jumlah pukulan dan kadar air dengan menggunakan grafik semi logaritmik sebagai penentuan kadar air dengan jumlah pukulan sebanyak 25 kali. Gambar 2.5 menunjukkan kurva yang digunakan untuk menentukan batas cair.

2. Batas Plastis

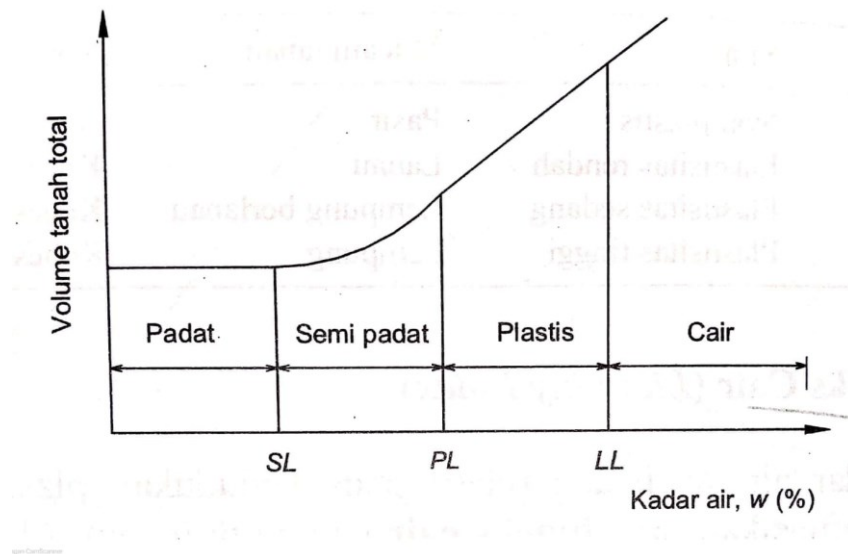
Batas plastis (PL) adalah kadar air antara daerah plastis dan semi padat (presentase kadar air dimana tanah akan retak pada saat digulung dengan ukuran partiket tanah 3,2 mm).

3. Batas Susut

Batas susut (SL) adalah kadar air antara daerah semi padat dan padat (persentase kadar air dimana perubahan volume tanah tidak disebabkan oleh penyusutan kadar air).



Gambar 2.5 Kurva untuk Penentuan Batas Cair



Gambar 2.6 Variasi Volume dan Kadar Air pada Kedudukan Batas Cair, Batas Plastis, dan Batas Susut

4. Indeks Plastisitas

Indeks plastisitas (PI) merupakan perbedaan batas cair dan batas plastis.

$$PI = LL - PL \quad (2.23)$$

Indeks plastisitas menyatakan plastisitas tanah. Tanah yang memiliki banyak butir lempung nilai indeks plastisitasnya tinggi. Sedangkan tanah lanau nilai indeks plastisitasnya lebih rendah sehingga penurunan kadar air sedikit saja akan menyebabkan tanah mengering. Indeks plastisitas, sifat, jenis tanah, dan batas kohesi diberikan oleh *Atterberg* dalam Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Nilai Indeks Plastisitas Tanah

No	PI	Sifat	Macam Tanah	Kohesi
1	0	Non plastis	Pasir	Non Kohesif
2	< 7	Plastisitas rendah	Lanau	Kohesif Sebagian
3	7-17	Plastisitas sedang	Lempung berlanau	Kohesif
4	>17	Plastisitas tinggi	Lempung	Kohesif

5. Indeks Cair

Indeks cair (*liquidity index*), LI adalah kadar air tanah asli relative pada daerah plastis dan cair.

$$LI = \frac{W_N - PL}{LL - PL} = \frac{W_N - PL}{PI} \quad (2.24)$$

2.3 Penyelidikan Tanah

Pembangunan konstruksi sangat membutuhkan data setiap lapisan tanah pada lokasi pembangunan. Data tersebut digunakan dalam merencanakan fondasi yang sesuai dengan kebutuhan jenis tanah sehingga dapat memikul beban-beban diatasnya sesuai dengan yang telah direncanakan. Penyelidikan tanah bisa diuji langsung di lapangan atau hanya mengambil sampel tanah dan mengujinya di laboratorium. Metode penyelidikan tanah yang dapat dilakukan diantaranya sebagai berikut.

1. Penyelidikan Lapangan: SPT, Sondir, Uji beban pelat, Uji geser kipas atau geser baling
2. Penyelidikan Laboratorium: Tanah terganggu (butiran tanah/gradasi tanah, uji plastisitas, uji kepadatan. Tanah tak terganggu (Uji kuat geser, uji konsolidasi, permeabilitas tanah), Uji triaksial, Uji kadar air.

2.3.1 Uji Penetrasi Standar (SPT)

Uji penetrasi standar merupakan salah satu metode penyelidikan tanah yang dilakukan secara langsung dilapangan untuk mendefinisikan perlawanan dinamik tanah. Selain itu, pengujian ini digunakan apabila terjadi kesulitan untuk mendapat sampel tanah granuler yang tak terganggu. Pada pengujian SPT penentuan sifat tanah pasir berdasarkan kerapatan relatif partikel tanah. Prosedur uji SPT sesuai dengan ASTM D 1586.

Hasil uji SPT ini berupa nilai N-SPT yang pada pemukulan kedua dengan jumlah pukulan yang dibutuhkan untuk penetrasi tabung belah standar sedalam 30,48 cm. Sistem uji SPT yaitu dengan melakukan pemukulan tabung belah menggunakan beban sebesar 63,5 kg sebagai palu pemukul dan tinggi jatuh 76 cm. Setiap kedalaman 15 cm dilakukan pencatatan jumlah pukulan, uji SPT dapat

dihentikan apabila jumlah pukulan melebihi 50 kali sebelum penetrasi 30 cm tercapai, namun nilai penetrasi tetap dicatat (Badan Standardisasi Nasional, 2008b).

Perencanaan fondasi digunakan nilai N untuk indikasi kemungkinan model keruntuhan fondasi yang akan terjadi. Apabila nilai $N < 5$ kemungkinan keruntuhan yang terjadi berupa keruntuhan geser lokal (*local shear failure*). Sedangkan jika nilai $N > 30$ dapat terjadi keruntuhan geser umum (*general shear failure*). Nilai N antara 5 dan 30 dilakukan interpolasi linier dari koefisien kapasitas dukung tanah N_c , N_q , N_γ . Apabila nilai kerapatan relative (D_r) diketahui, maka nilai N dapat dilakukan dengan pendekatan menggunakan persamaan (2.25) (Hardiyatmo, Christady, 2014).

$$N = 1,7 D_r^2 (14,2 P_o' + 10) \quad (2.25)$$

Keterangan:

D_r = Kerapatan relatif

P_o' = Tekanan vertical beban tanah efektif pada kedalaman tanah yang ditinjau, atau tekanan overburden efektif.

Tabel 2.7 Hubungan N dengan Kerapatan Relatif (D_r) Tanah Pasir

No	Nilai N	Kerapatan Relatif (D_r)
1	< 4	Sangat tidak padat
2	4 - 10	Tidak padat
3	10 - 30	Kepadatan sedang
4	30 - 50	Padat
5	> 50	Sangat padat

Pada tanah lempung jenuh, nilai N-SPT terikat dengan dengan kuat tekan-bebas. Uji tekan-bedas dilakukan untuk mendapat kuat tekan-bebas (q_u), dengan $C_u = 0,5 q_u$ dan $\phi = 0$. Hubungan empiris C_u dan N seperti pada persamaan (2.26).

$$C_u = 6 N \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) \quad (2.26)$$

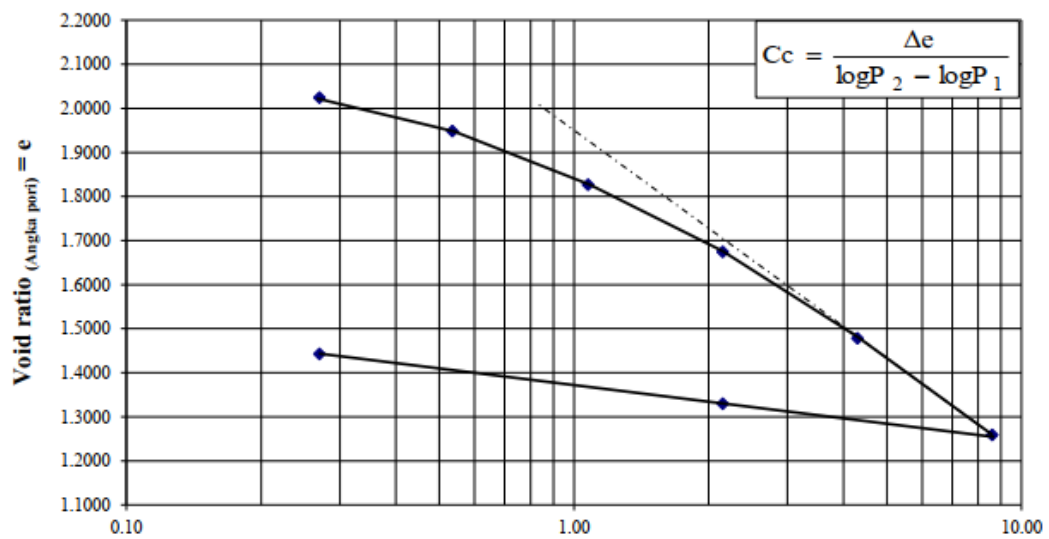
Tabel 2.8 Hubungan Nilai N, Konsistensi dan Kuat Tekan-Bebas (q_u) pada Tanah Lempung Jenuh

No	Nilai N	Konsistensi	Kuat tekan bebas (q_u) (kN/m ²)
1	< 2	Sangat lunak	< 25
2	2 - 4	Lunak	25 - 50
3	4 - 8	Sedang	50 - 100
4	8 - 15	Kaku	100 - 200
5	15 - 30	Sangat kaku	200 - 400
6	> 30	Keras	> 400

2.3.2 Uji Konsolidasi

Konsolidasi merupakan pemampatan tanah akibat pembebanan dengan jangka waktu tertentu, sehingga tanah mengalami perubahan volume yang disebabkan oleh keluarnya air dari ruang pori tanah. Uji konsolidasi bertujuan untuk mengetahui parameter konsolidasi tanah yaitu koefisien dan indeks kompresibilitas, koefisien konsolidasi, serta hubungan waktu dan penurunan pada tanah.

Uji konsolidasi dilakukan berdasarkan teori Terzaghi pada tanah lempung dan tanah lanau yang jenuh air. Diameter minimum benda uji yang digunakan 50 mm dengan tinggi 13 mm, atau dengan perbandingan 2,5 antara diameter dan tinggi benda uji. Pembebanan dilakukan secara bertahap dari 1 kg sampai 32 kg selama 24 jam (Badan Standardisasi Nasional, 2011). Hasil uji konsolidasi berupa grafik seperti pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Grafik Hasil Uji Konsolidasi

2.3.3 Uji Kadar Air

Kadar air tanah merupakan perbandingan berat air pada rongga pori tanah dengan berat partikel material tanah yang tidak terlarut dalam air. Kadar air tanah digunakan dalam menentukan hubungan air, fase udara, partikel padat pada volume tanah. Uji kadar air dilakukan dengan mengeringkan benda uji selama 12 sampai 16 jam didalam oven hingga berat tanahnya konstan. Kadar air dapat dihitung dari berat benda uji kering dan berat air, dimana berat air adalah kehilangan berat pada benda uji akibat pengeringan (Badan Standardisasi Nasional, 2008a). Benda uji memiliki berat minimum basah, klasifikasi berat minimum material basah dapat dilihat pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Berat Minimum Material Basah

No	Ukuran Maksimum	Saringan Standar	Berat Minimum Benda Uji untuk Kadar Air $\pm 0,1\%$	Berat Minimum Benda Uji untuk Kadar Air $\pm 1\%$
	(mm)	(in)	(kg)	(gram)
1	$\leq 2,0$	No. 10	0,02	20
2	4,75	No. 4	0,10	20
3	9,5	3/8	0,50	50
4	19,0	3/4	2,50	250

No	Ukuran Maksimum	Saringan Standar	Berat Minimum Benda Uji untuk Kadar Air $\pm 0,1\%$	Berat Minimum Benda Uji untuk Kadar Air $\pm 1\%$
5	37,5	1 1/2	10	1000
6	75,0	3,0	50	5000

2.3.4 Uji Triaksial

Uji triaksial dapat dilakukan pada berbagai jenis tanah seperti tanah lempung, lanau, dan batuan lunak. Pengujian ini mendapat hasil berupa nilai kuat geser tanah yang kemudian digunakan dalam menghitung kapasitas dukung tanah (Hardiyatmo, Christady, 2014). Uji triaksial memiliki beberapa jenis pengujian, yaitu:

1. Uji triaksial tak terkonsolidasi-tak terdrainase (*Unconsolidated-Undrained*)
2. Uji triaksial terkonsolidasi-tak terdrainase (*Consolidated-Undrained*)
3. Uji triaksial terkonsolidasi dan terdrainase (*Consolidated-Drained*).

Uji triaksial UU dilakukan dengan memberikan beban pada benda uji yang berupa tegangan sel (σ_3) dan beban normal berupa tegangan deviator ($\Delta\sigma_{df}$) hingga terjadi keruntuhan. Pada pengujian tegangan deviator selama penggeserannya air tidak boleh keluar dari benda uji dengan menutup katup drainase. Keadaan tanpa drainasi menyebabkan tekanan kelebihan tekanan pori karena tidak ada tahanan geser hasil perlawanan dari butiran tanah. Uji triaksial UU hanya mengukur kuat geser tegangan total tanpa memperhitungkan tekanan air pori (Badan Standardisasi Nasional, 2015)

Uji triaksial CU dan CD bertujuan untuk mendapat kuat geser (ϕ' , C') dan hubungan tegangan regangan benda uji. Pada uji CU penggeseran dilakukan tanpa drainase, sedangkan untuk uji CD dilakukan sebaliknya. Kecepatan gerak selama pengujian dibuat konstan dengan beban aksial tekan (Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air, 2018). Selama pengujian triaksial CU berlangsung pengukuran terhadap $\Delta\sigma_d$ (tegangan deviator) dan Δu_d (kenaikan tegangan air pori) dilakukan secara terus-menerus.

2.4 Parameter Tanah

Parameter tanah merupakan acuan yang digunakan untuk mengetahui jenis dan sifat fisik tanah. Parameter tanah didapatkan dari penyelidikan tanah (*soil investigation*) baik secara langsung di lapangan maupun hasil uji sampel di laboratorium. Parameter tanah disesuaikan dengan pelapisan tanah yang mengacu pada jenis dan kekuatannya (Gusnadi et al., 2023). Hasil parameter tanah yang memadai digunakan sebagai acuan untuk penentuan jenis fondasi, jenis konstruksi maupun metode pelaksanaan konstruksi. Sehingga dapat dihasilkan konstruksi yang aman, nyaman dan ekonomis dari segi biaya.

Laporan hasil uji sampel di laboratorium tidak mendapatkan hasil keseluruhan parameter tanah yang dibutuhkan untuk perhitungan daya dukung dan penurunan tanah. sehingga dilakukan analisis korelasi dari nilai N-SPT yang ada. Korelasi berupa pendekatan karakteristik tanah di lapangan berdasarkan teori yang sesuai.

2.4.1 Parameter Daya Dukung Tanah

1. Berat Isi Tanah Normal (γ_b) dan Tersaturasi (γ_{sat})

Berat isi tanah (γ) merupakan perbandingan 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 yang ditunjukkan pada persamaan (2.27).

$$\gamma = w / v \quad (2.27)$$

Dimana:

γ : Berat isi tanah (kN/m³)

w : Berat tanah

v : Volume tanah

Berat isi tanah dapat disesuaikan dengan jenis tanah seperti pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Berat Isi Tanah Berdasarkan Jenis Tanah

		Bulk unit weight (kN/m³)		Saturated unit weight (kN/m³)	
		Loose	Dense	Loose	Dense
<i>Granular soils</i>	<i>Gravel</i>	16,0	18,0	20,0	21,0
	<i>Well graded sand and gravel</i>	19,0	21,0	21,5	23,0
	<i>Coarse or medium sand</i>	16,5	18,5	20,0	21,5
	<i>Well graded sand</i>	18,0	21,0	20,5	22,5
	<i>Fine or silty sand</i>	17,0	19,0	20,0	21,5
	<i>Rock fill</i>	15,0	17,5	19,5	21,0
	<i>Brick hardcore</i>	13,0	17,5	16,5	19,0
	<i>Slag fill</i>	12,0	15,0	18,0	20,0
	<i>Ash fill</i>	6,5	10,0	13,0	15,0
<i>Cohesive soils</i>	<i>Peat (high variability)</i>	12,0		12,0	
	<i>Organic clay</i>	15,0		15,0	
	<i>Soft clay</i>	17,0		17,0	
	<i>Firm clay</i>	18,0		18,0	
	<i>Stiff clay</i>	19,0		19,0	
	<i>Hard clay</i>	20,0		20,0	
	<i>Stiff or hard glacial clay</i>	21,0		21,0	

2. Kohesi (C_u)

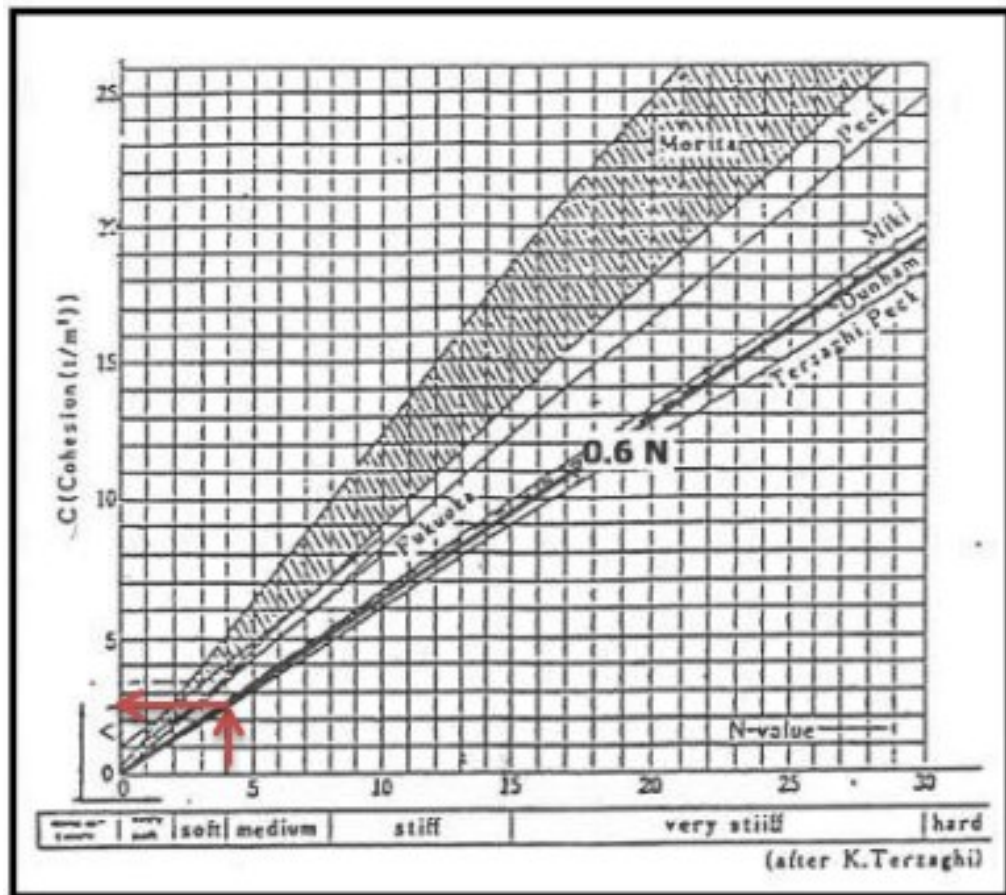
Kohesi merupakan daya tarik antar partikel di dalam tanah, yang dapat disebabkan oleh daya tarik molekuler atau daya listrik. Tanah yang memiliki nilai kohesi tinggi akan cenderung lebih keras dan kemungkinan terjadi deformasi lebih kecil. Kohesi terutama terkait dengan tanah lempung dan tanah berbutir. Tabel 2.11 merupakan penentuan nilai kohesi (C_u) berdasarkan jenis tanah.

Tabel 2.11 Penentuan Nilai Kohesi (C_u)

<i>Material</i>	<i>Description</i>	<i>DCP – n</i> <i>(Blows/100 mm)</i>	<i>Strength</i>
<i>Clays</i>	<i>V. Soft</i>	0-1	$C_u = 0-12 \text{ kPa}$
	<i>Soft</i>	1-2	$C_u = 12-25 \text{ kPa}$
	<i>Firm</i>	2-3	$C_u = 25-50 \text{ kPa}$
	<i>Stiff</i>	3-7	$C_u = 50-100 \text{ kPa}$
	<i>V. Stiff</i>	7-12	$C_u = 100-200 \text{ kPa}$
	<i>Hard</i>	>12	$C_u > 200 \text{ kPa}$
<i>Sands</i>	<i>V. Loose</i>	0-1	$\Phi < 30^\circ$
	<i>Loose</i>	1-3	$\Phi = 30-35^\circ$
	<i>Med dense</i>	3-8	$\Phi = 35-40^\circ$
	<i>Dense</i>	8-15	$\Phi = 40-45^\circ$
	<i>V. Dense</i>	>15	$\Phi > 45^\circ$
<i>Gravels, Cobbles, Boulders*</i>		>10	$\Phi = 35^\circ$
		>20	$\Phi > 40^\circ$
<i>Rock</i>		>10	$C' = 25 \text{ kPa}, \Phi > 30^\circ$
		>20	$C' > 50 \text{ kPa}, \Phi > 30^\circ$

Selain dengan penyesuaian jenis tanah, nilai kohesi (c_u) juga dapat dicari dengan persamaan (2.28) dari grafik empiris hubungan nilai N-SPT dengan kohesi tanah pada Gambar 2.8.

$$C_u = N_{spt} \times \frac{2}{3} \times 10 \quad (2.28)$$



Gambar 2.8 Grafik Empiris Hubungan Nilai N-SPT dengan Kohesi Tanah

Selain nilai kohesi juga harus ditentukan nilai kohesi efektif (C') dengan menggunakan persamaan interpolasi seperti pada persamaan (2.29).

$$C' = \left(\frac{N - N_{\text{bawah}}}{N_{\text{atas}} - N_{\text{bawah}}} \right) \times (C'_{\text{atas}} - C'_{\text{bawah}}) + C'_{\text{bawah}} \quad (2.29)$$

Berdasarkan konsistensi tanah nilai c' dapat dilihat pada tabel Tabel 2.12 dibawah ini.

Tabel 2.12 Nilai C' dan ϕ'

Soil group	Typical soils in group	Soil parameters	
		C' (kPa)	ϕ' (degrees)
Poor	Soft and firm clay of medium to high plasticity; silty clays; loose variable clayey fills; loose sandy silts	0-5	17-25
Average	Stiff sandy clays; gravelly clays; compact clayey sands and sandy silts; compacted clay fills	0-10	26-32

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

3. Sudut geser (ϕ)

Sudut Geser adalah sudut antara bidang geser dalam tanah dan bidang horizontal. Nilai sudut geser (ϕ) berbeda-beda tergantung pada jenis tanah. Semakin besar sudut geser tanah maka tanah tersebut akan lebih tahan untuk menerima tegangan luar. Besaran nilai sudut geser tanah (ϕ) berhubungan dengan kepadatan tanah seperti pada Tabel 2.13.

Tabel 2.13 Besaran Sudut Geser dalam Tanah

No	Tingkat Kepadatan	Sudut Geser Dalam (ϕ)
1	Sangat Lepas	< 30
2	Lepas	30 – 35
3	Agak Padat	35 – 40
4	Padat	40 – 45
5	Sangat Padat	> 45

Selain sudut geser tanah (ϕ) juga harus ditentukan nilai sudut geser efektif (ϕ') berdasarkan konsistensi tanah seperti pada Tabel 2.12. Perhitungan sudut geser efektif dapat menggunakan persamaan (2.30).

$$\phi' = \left(\frac{N - N_{\text{bawah}}}{N_{\text{atas}} - N_{\text{bawah}}} \right) \times (\phi'_{\text{atas}} - \phi'_{\text{bawah}}) + \phi'_{\text{bawah}} \quad (2.30)$$

2.4.2 Parameter Penurunan Tanah

2.4.2.1 Penurunan elastic/segera

1. Poisson rasio (μ)

Angka *Poisson* (*Poisson's Ratio*) merupakan perbandingan regangan transversal (tegak lurus) terhadap regangan longitudinal saat diberi tegangan aksial dalam kondisi elastis. Nilai *poisson* rasio dapat ditentukan berdasarkan jenis tanah seperti yang terlihat dalam Tabel 2.14.

Tabel 2.14 Nilai *Poisson Ratio* Berdasarkan Jenis Tanah

<i>Material</i>	<i>Poisson's ratio</i>
<i>Saturated clays (undrained)</i>	0,5
<i>Saturated clays (drained)</i>	0,2-0,4
<i>Dense sand</i>	0,3-0,4
<i>Loose sand</i>	0,1-0,3
<i>Loess</i>	0,1-0,3
<i>Ice</i>	0,36
<i>Aluminum</i>	0,35
<i>Steel</i>	0,29
<i>Concrete</i>	0,15

2. Modulus elastisitas (E_s)

Modulus elastisitas merupakan ukuran kekakuan atau ketahanan bahan terhadap deformasi elastis saat gaya diterapkan. Semakin tinggi nilai modulus elastisitas, maka bahan akan semakin kaku. Modulus elastis dapat dihitung menggunakan persamaan (2.31).

$$E = \frac{\sigma}{e} \quad (2.31)$$

Dimana:

E : Modulus elastisitas

σ : Tegangan

e : Regangan

Tegangan sebagai gaya yang menyebabkan deformasi dibagi dengan daerah dimana gaya diterapkan dan regangan adalah rasio perubahan parameter panjang yang disebabkan oleh deformasi. Penentuan modulus elastisitas juga dapat dilakukan dengan pendekatan nilai modulus elastisitas setiap jenis tanah seperti pada Tabel 2.15.

Tabel 2.15 Pendekatan Nilai Modulus Elastisitas

No	Tipe	Kondisi	Modulus Elastisitas (E) (kPa)	
			Jangka Pendek	Jangka Panjang
1	Kerikil	Longgar	25.000 – 50.000	
		Longgar	25.000 – 50.000	
		Kepadatan sedang	50.000 – 100.000	
		Padat	100.000 – 200.000	
2	Pasir butiran sedang sampai kasar	Sangat longgar	< 5.000	
		Longgar	3.000 – 10.000	
		Kepadatan sedang	8.000 – 30.000	
		Padat	25.000 – 50.000	
		Sangat padat	40.000 – 100.000	
3	Pasir halus	Longgar	5.000 – 10.000	
		Kepadatan sedang	10.000 – 25.000	
		Padat	25.000 – 50.000	
4	Lanau	Lunak	< 10.000	< 8.000
		Kaku	10.000 – 20.000	8.000 – 15.000
		Keras	> 20.000	> 15.000
5	Lempung	Sangat lunak	< 3.000	< 2.000
		Lunak	2.000 – 7.000	1.000 – 5.000
		Sedang	5.000 – 12.000	4.000 – 8.000
		Kaku	10.000 – 25.000	7.000 – 20.000
		Sangat kaku	20.000 – 50.000	15.000 – 35.000
		Keras	40.000 – 80.000	30.000 – 60.000

2.4.2.2 Penurunan Konsolidasi

1. Angka pori (e)

Angka pori (e) adalah hasil perbandingan besarnya volume ruang kosong dan volume butir padat pada tanah. Semakin besar nilai angka pori maka semakin kecil daya dukung yang dimiliki tanah. Angka pori (e) juga mempengaruhi waktu dan tinggi kejut kapiler pada tanah berbutir halus. Penentuan angka pori (e) dapat disesuaikan dengan jenis tanah ditunjukkan pada Tabel 2.16.

Tabel 2.16 Besaran Angka Pori (e)

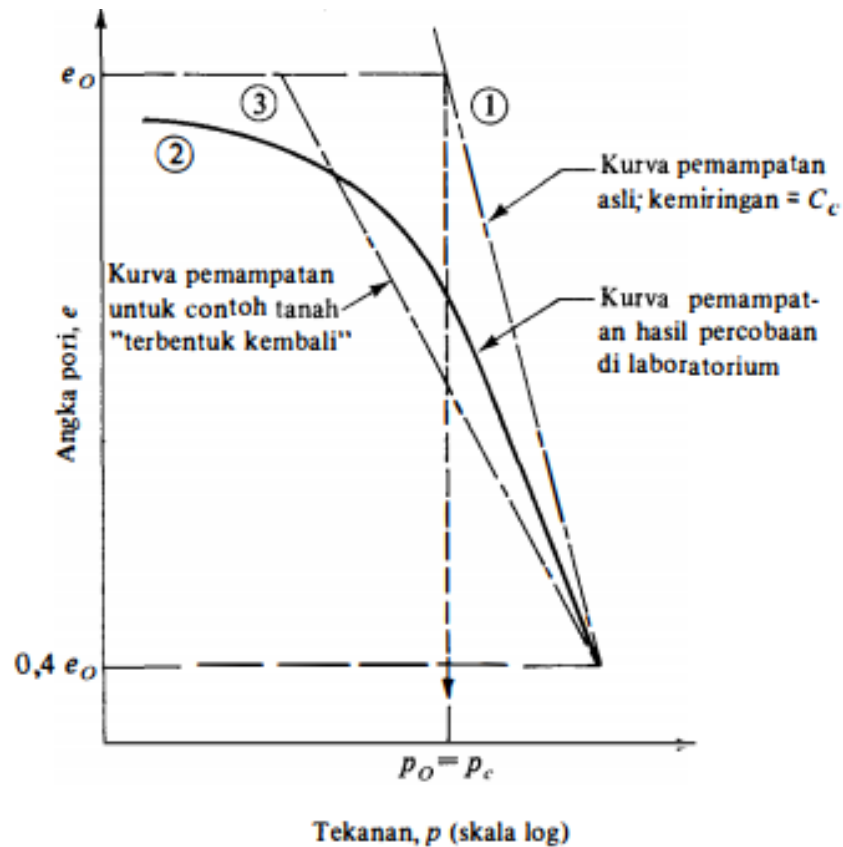
<i>Type of soil</i>	<i>Void ratio, e</i>	<i>Natural moisture content in a saturated state (%)</i>	<i>Dry unit weight, γ_d</i>	
			<i>Lb/ft³</i>	<i>kN/m³</i>
<i>Loose uniform sand</i>	0,8	30	92	14,5
<i>Dense uniform sand</i>	0,45	16	115	18
<i>Loose angular-grained silty sand</i>	0,65	25	102	16
<i>Dense angular-grained silty sand</i>	0,4	15	121	19
<i>Stiff clay</i>	0,6	21	108	17
<i>Soft clay</i>	0,9-1,4	30-50	73-93	11,5-14,5
<i>Loess</i>	0,9	25	86	13,5
<i>Soft organic clay</i>	2,5-3,2	90-120	38-51	6-8
<i>Glacial till</i>	0,3	10	134	21

2. Indeks kompresi (C_c)

Indeks Kompresi (C_c) merupakan parameter tanah yang digunakan untuk menghitung penurunan akibat konsolidasi. Indeks Kompresi didapat pada uji konsolidasi laboratorium, sehingga didapat kurva hubungan antara angka pori dan tekanan seperti pada Gambar 2.9. Sedangkan untuk penentuan nilai C_c berdasarkan jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 2.17.

Tabel 2.17 Nilai Indeks Kompresi (C_c)

No	Jenis Tanah	Nilai C_c
1	Gambut	1,00 – 4,50
2	Lempung plastis	0,15 – 1,00
3	Lempung Kaku	0,06 – 0,15
4	Lempung setengah kaku	0,03 – 0,06
5	Pasir lepas	0,025 – 0,05
6	Pasir padat	0,005 – 0,01



Gambar 2.9 Kurva Hubungan Angka Pori dan Tekanan

Tabel 2.18 Nilai Pemampatan dan Pemuaian Asli

Tanah	Batas Cair	Batas Plastis	Indeks Pemampatan C_c	Indeks Pemuaian C_s
Lempung Boston <i>Blue</i>	41	20	0,35	0,07
Lempung Chicago	60	20	0,4	0,07
Lempung Ft. Gordon Georgia	51	26	0,12	
Lempung New Orleans	80	25	0,3	0,05
Lempung Montana	60	28	0,21	0,05

Nilai indeks kompresi (C_c) yang lebih tinggi menunjukkan bahwa tanah lebih kompresibel atau lebih rentan terhadap perubahan volume saat diberi tekanan. Sedangkan, apabila nilai C_c lebih rendah menunjukkan tanah tersebut kurang kompresibel. Menurut Koppula (1981) persamaan (2.32) dapat digunakan untuk menentukan nilai C_c .

$$C_c = 0,01 w_n \quad (2.32)$$

Nilai w_n dalam bentuk persentase, persamaan diatas dapat diubah kedalam bentuk persamaan (2.33) Untuk jenis tanah lempung jenuh dan G_s diasumsikan sebesar 2,70.

$$C_c = 0,37 e_0 \quad (2.33)$$

3. Indeks rekompresi (C_r)

Indeks rekompresi tanah (*soil rebound index*) merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur elastisitas tanah dan sejauh mana tanah akan kembali ke bentuk aslinya setelah beban dihilangkan. Nilai indeks rekompresi biasanya lebih kecil daripada indeks kompresi. Persamaan (2.34) dapat digunakan untuk menentukan indeks rekompresi.

$$C_r = \left(\frac{1}{5}\right) \times C_c \text{ sampai } \left(\frac{1}{10}\right) \times C_c \quad (2.34)$$

4. Koefisien konsolidasi (C_v)

Koefisien konsolidasi (C_v) parameter yang menunjukkan kemampuan tanah untuk mengalami konsolidasi atau perubahan volume karena penambahan beban. Koefisien konsolidasi (C_v) berpengaruh terhadap kecepatan konsolidasi pada tanah. Nilai C_v diperoleh dari uji konsolidasi laboratorium, di mana sampel tanah diberikan beban dan perubahan volume dan waktu direkam. Penentuan koefisien konsolidasi (C_v) disesuaikan dengan jenis tanah dan menggunakan persamaan (2.35).

$$C_v = \left(\frac{N - N_{\text{bawah}}}{N_{\text{atas}} - N_{\text{bawah}}} \right) \times (C_{v_{\text{atas}}} - C_{v_{\text{bawah}}}) + C_{v_{\text{bawah}}} \quad (2.35)$$

Tabel 2.19 Besaran Koefisien Konsolidasi (C_v) Berdasarkan Jenis Tanah

No	Soil Type (Unified Classification)	C_v	
		cm^2/s	m^2/a
1	Low Plasticity clays (CL)	0,001-0,006	3-19
2	Low Plasticity glacial lake clays (CL)	0,0006-0,0009	2-3
3	Low plasticity mud (CL)	0,0002-0,0004	0,6-1,2

No	Soil Type (Unified Classification)	C_v	
		cm^2/s	m^2/a
4	Medium plasticity clays (CL-CH)	<0,0001-0,0003	<0,3-0,9
5	Volcanic silt (MH)	0,0001-0,00015	0,3-0,5
6	Organic Silt (OL)	0,0002-0,001	0,6-3,0

2.5 Fondasi

Fondasi adalah bagian yang sangat penting pada struktur bangunan. Setiap konstruksi bangunan harus memiliki fondasi yang kuat agar dapat menopang beban yang berada di atasnya. Stabilitas bangunan salah satunya ditentukan oleh perencanaan fondasi yang tepat sesuai dengan daya dukung tanah yang diijinkan pada lokasi tersebut. Hasilnya bangunan dapat berdiri dengan sempurna tanpa mengakibatkan keruntuhan, geser tanah, dan penurunan (*settlement*) yang berujung pada kerusakan bangunan (Candra, 2017).

2.5.1 Klasifikasi Fondasi

Fondasi merupakan struktur bawah dalam bangunan yang memiliki fungsi meneruskan beban struktur atas ke lapisan tanah atau lapisan dibawahnya. Fondasi dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu fondasi dangkal dan fondasi dalam. Penentuan klasifikasi fondasi didasarkan pada perbandingan lebar fondasi (B) dengan kedalaman fondasi (D), fondasi dangkal memiliki perbandingan $D/B < 1$ dan apabila $D/B > 4$ maka fondasi tersebut termasuk fondasi dalam.

2.5.1.1 Fondasi dangkal

Fondasi dangkal merupakan fondasi yang mendukung beban secara langsung. Umumnya fondasi dangkal digunakan pada bangunan yang memiliki beban relatif ringan dengan kondisi tanah stabil (Hardiyatmo, Christady, 2014). Kedalaman fondasi dangkal biasanya kurang dari 1/3 lebar fondasi, biasanya tidak lebih dari 3 meter. Fondasi dangkal diantaranya yaitu fondasi telapak, fondasi rakit, dan fondasi menerus.

2.5.1.2 Fondasi dalam

Fondasi dalam adalah jenis fondasi yang berguna untuk meneruskan beban bangunan di atasnya ke lapisan tanah keras atau batuan yang terletak relatif jauh dari

permukaan tanah. Fondasi dalam biasanya memiliki kedalaman lebih dari 3 meter. Jenis fondasi dalam, diantaranya:

1. Fondasi Sumuran (*pier foundation*)

Fondasi sumuran digunakan pada tanah dasar yang memiliki kedalaman cukup dalam. Fondasi ini sebagai fondasi peralihan dari fondasi dangkal ke fondasi tiang. Daya dukung ujung (*end bearing capacity*) fondasi sumuran didapat dari perhitungan tekanan ujung tiang, sedangkan daya dukung geser atau selimut (*friction bearing capacity*) dari daya dukung geser antara tanah sekeliling dengan fondasi (Trinanda, 2021).

2. Fondasi Tiang (*pile foundation*)

Fondasi tiang merupakan fondasi yang digunakan pada bangunan apabila lapisan tanah kuat untuk lokasi fondasi berada sangat dalam. Selain itu, fondasi tiang juga digunakan untuk bangunan tingkat tinggi yang dipengaruhi gaya-gaya penggulingan beban angin. Penggunaan fondasi tiang dimaksudkan agar beban bangunan dapat diteruskan ke tanah yang relatif lunak sampai pada kedalaman tertentu hingga mencapai lapisan tanah kaku. Sehingga fondasi dapat memberi daya dukung yang maksimal untuk bangunan tersebut (Hardiyatmo, Christady, 2015).

Berdasarkan metode pelaksanaannya, fondasi tiang dibagi kedalam tiga jenis, yaitu:

- Fondasi tiang pancang (*driven pile*), pemasangan fondasi ini dengan memancang atau menekan tiang berbentuk bulat atau bujursangkat ke dalam tanah.
- Fondasi tiang bor (*bored pile*), proses pengerjaannya diawali dengan melakukan pengeboran tanah hingga kedalaman yang direncanakan, kemudian memasukkan tulangan baja dan mengisinya dengan beton.
- Kaison (*caisson*) disebut juga sebagai tiang bor dengan diameter lebih besar.

2.6 Fondasi Tiang Bor (Bored Pile)

Fondasi tiang bor merupakan fondasi tiang dimana pemasangannya dilakukan dengan cara mengebor tanah terlebih dahulu. Fondasi ini biasanya akan

digunakan pada bangunan yang lapisan tanah kuatnya terletak sangat dalam (Ully Nurul Fadilah, 2018). Fondasi tiang bor disebut juga sebagai tiang *non-displacement* dikarenakan proses pemasangan fondasi tidak memindahkan tanah. Daya dukung yang diijinkan pada fondasi harus lebih besar dari beban yang ditahan fondasi, baik beban statis maupun beban dinamis, begitu juga apabila terjadi pengurangan tidak boleh melebihi pengurangan yang diijinkan (Ramdhany & Permana, 2021) .

Fondasi tiang bor memiliki beberapa keunggulan, diantaranya.

1. Tidak menimbulkan resiko kenaikan muka tanah.
2. Kedalaman tiang dapat disesuaikan dengan rencana.
3. Penggunaan tiang bor dapat dibuat untuk menembus batuan.
4. Diameter tiang lebih besar dari tiang pancang, sehingga memungkinkan untuk memberi kapasitas dukung yang lebih besar.
5. Pemasangan fondasi tiang bor tidak menimbulkan suara atau getaran, sehingga proyek konstruksi yang berada di daerah yang ramai penduduk lebih banyak menggunakan jenis fondasi tiang bor.

Selain memiliki keunggulan, penggunaan fondasi tiang bor juga dapat memberikan kerugian. Kerugian yang ditimbulkan diantaranya:

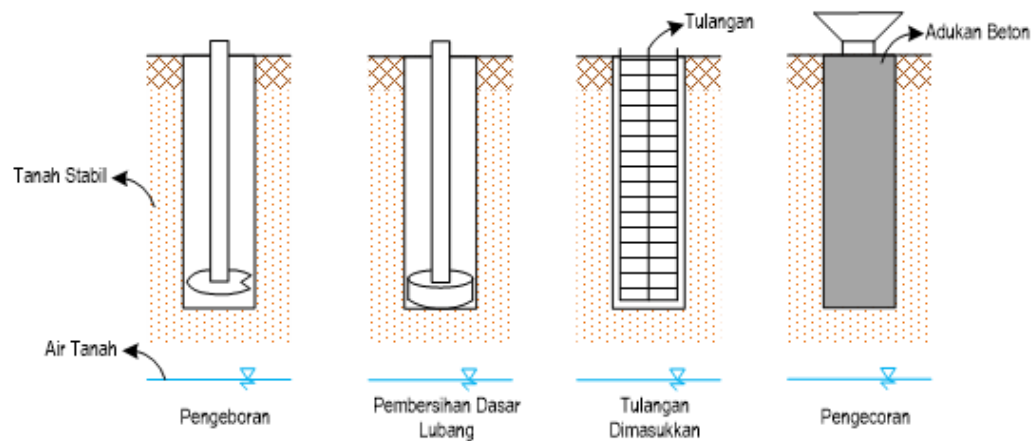
1. Kondisi cuaca dapat mempengaruhi pelaksanaan pengecoran tiang.
2. Pengeboran dapat berakibat pada kepadatan tanah, terutama tanah berkerikil atau tanah pasir.
3. Mutu beton hasil pengecoran yang tidak seragam dapat mengurangi kapasitas dukung tiang bor.
4. Kapasitas dukung tiang bor dapat berkurang dengan adanya air yang mengalir ke dalam lubang bor.

2.6.1 Metode Pelaksanaan Tiang Bor

2.6.1.1 Metode Kering (*Dry Method*)

Metode kering yaitu metode pemasangan tiang bor yang digunakan pada tanah di atas muka air tanah, seperti tanah lempung kaku dan tanah pasir dengan sedikit kohesi. Lubang bor dibuat dengan menggunakan mesin bor tanpa pipa

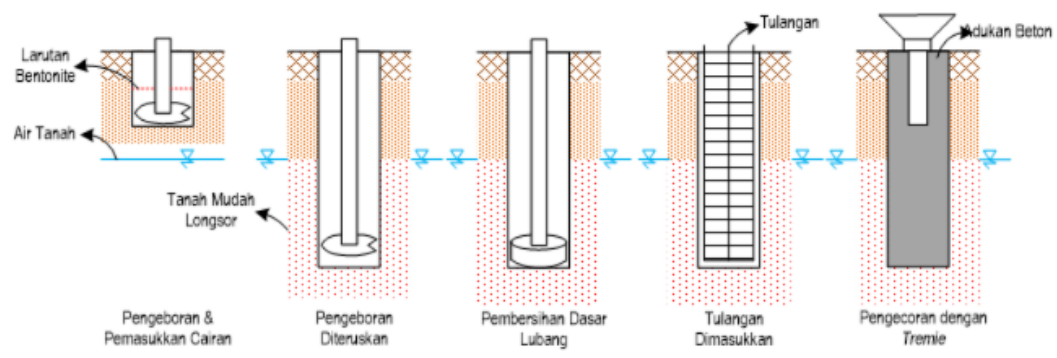
pelindung dan tanah diangkat setiap 0,5 m. (*casing*). Gambar 2.10 menunjukkan tahapan pengerjaan tiang bor metode kering.



Gambar 2.10 Pengerjaan Tiang Bor Metode Kering

2.6.1.2 Metode Basah (*Wash Method*)

Metode basah digunakan apabila pengeboran melewati muka air tanah. Pada lubang bor diisi larutan tanah lempung/*bentonite* atau polimer yang berasal dari tembakan air lewat selang bor, sehingga pengeboran dilakukan di dalam larutan atau lumpur. Larutan yang keluar pada saat pengeboran ditampung dan digunakan kembali untuk pengeboran selanjutnya. Tahapan pengerjaannya dapat dilihat pada Gambar 2.11.

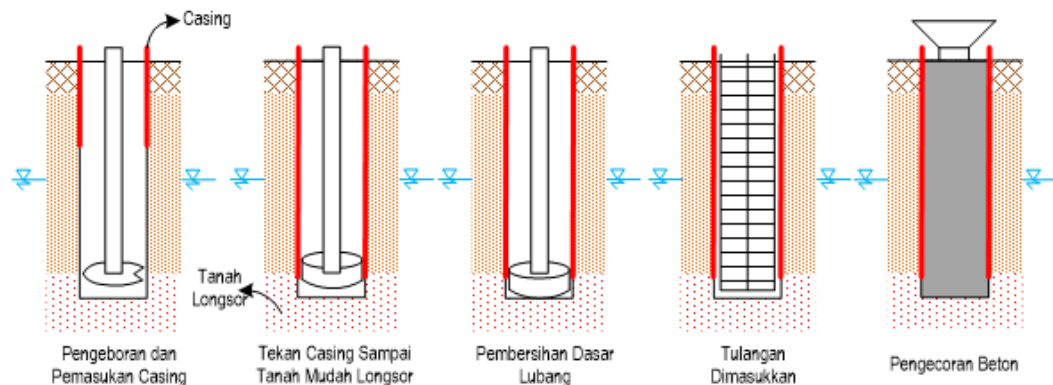


Gambar 2.11 Pengerjaan Tiang Bor Metode Basah

2.6.1.3 Metode *Casing*

Metode *casing* dipakai untuk tanah yang sangat mudah longsor, seperti jenis tanah pasir bersih di bawah muka air tanah. Sehingga untuk menahan longsor

tanah digunakan pipa selubung baja (*casing*). Gambar 2.12 menunjukkan proses pengerjaan tiang bor dengan metode *casing*.



Gambar 2.12 Pengerjaan Tiang Bor Metode *Casing*

2.6.2 Pengaruh Pemasangan Tiang Bor

2.6.2.1 Tiang Bor pada Tanah Granuler

Fondasi tiang bor pada tanah granuler membutuhkan *casing* untuk melindungi dari longsoran dinding galian. Sudut gesek dalam ultimit digunakan untuk perhitungan kapasitas dukung tiang bor pada tanah pasir.

2.6.2.2 Tiang Bor pada Tanah Kohesif

Pengeboran fondasi tiang bor akan mengakibatkan gangguan dan pelunakan di dasar lubang tanah lempung, sehingga berakibat pada bertambah besar penurunan. Pemasangan tiang bor pada adhesi sisi tiang dan tanah sekitarnya menyebabkan nilai adhesi akan lebih kecil dari kohesi tak terdrainase (*undrained cohesion*) sebelum tiang bor dipasang. (Hardiyatmo, Christady, 2015).

2.6.3 Spesifikasi Dimensi Fondasi Tiang Bor

Fondasi bor pile memiliki kedalaman bervariasi dari 6 m sampai 30 m sesuai dengan kedalaman tanah keras pada lokasi tersebut. Selain itu, fondasi bor pile dapat dibedakan menjadi dua kategori yaitu kategori kecil dan besar. Bor pile kategori besar memiliki diameter 0,60 m sampai 1,50 m, sedangkan bor pile dengan diameter 0,20 m sampai 0,30 m termasuk dalam kategori kecil. Namun untuk bor pile jenis *franky* memiliki ciri khas pembesaran pada bagian bawah tiang dengan diameter tidak kurang dari 1 m (Surendro, 2015).

2.7 Kapasitas Dukung Fondasi Tiang Bor

Kapasitas dukung fondasi adalah kemampuan fondasi untuk menahan beban dari struktur yang berada di atasnya. Kapasitas dukung fondasi tiang bor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.36) yang digunakan untuk fondasi dangkal, yaitu (Das, 2007).

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (2.36)$$

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FK} \quad (2.37)$$

Dimana:

Q_u : Kapasitas dukung ultimit

Q_{all} : Kapasitas dukung ijin

Q_p : Kapasitas dukung ujung

Q_s : Kapasitas dukung selimut

1. Daya Dukung Ujung Ultimit

$$q_u = C_u \times N_c + q \times N_q + 0.5 \times B \times \gamma \times N_\gamma \quad (2.38)$$

Dimana:

q_u : Daya dukung ujung ultimit

C_u : Kohesi

B : Lebar fondasi

γ : Berat volume tanah

N_c, N_q, N_γ : Faktor daya dukung

Tabel 2.20 Faktor Daya Dukung

ϕ'	N_c'	N_q'	N_γ'	ϕ'	N_c'	N_q'	N_γ'
0	5,70	1,00	0,00	26	15,53	6,05	2,59
1	5,90	1,07	0,005	27	16,30	6,54	2,88
2	6,10	1,14	0,02	28	17,13	7,07	3,29

ϕ'	N_c'	N_q'	N_γ'	ϕ'	N_c'	N_q'	N_γ'
3	6,30	1,22	0,04	29	18,03	7,66	3,76
4	6,51	1,30	0,055	30	18,99	8,31	4,39
5	6,74	1,39	0,074	31	20,03	9,03	4,83
6	6,97	1,49	0,10	32	21,16	9,82	5,51
7	7,22	1,59	0,128	33	22,39	10,69	6,32
8	7,47	1,70	0,16	34	23,72	11,67	7,22
9	7,74	1,82	0,20	35	25,18	12,75	8,35
10	8,02	1,94	0,24	36	26,77	13,97	9,41
11	8,32	2,08	0,30	37	28,51	15,32	10,90
12	8,63	2,22	0,35	38	30,43	16,85	12,75
13	8,96	2,38	0,42	39	32,53	18,56	14,71
14	9,31	2,55	0,48	40	34,87	20,50	17,22
15	9,67	2,73	0,57	41	37,45	22,70	19,75
16	10,06	2,92	0,67	42	40,33	25,21	22,50
17	10,47	3,13	0,76	43	43,54	28,06	26,25
18	10,90	3,36	0,88	44	47,13	31,34	30,40
19	11,36	3,61	1,03	45	51,17	35,11	36,00
20	11,85	3,88	1,12	46	55,73	39,48	41,70
21	12,37	4,17	1,35	47	60,91	44,45	49,30
22	12,92	4,48	1,55	48	66,80	50,46	59,25
23	13,51	4,82	1,74	49	73,55	57,41	71,45
24	14,14	5,20	1,97	50	81,31	65,60	85,75
25	14,80	5,60	2,25				

Faktor daya dukung menurut Terzaghi seperti pada Tabel 2.20. Nilai B pada fondasi tiang diganti dengan nilai d yang nilainya akan relatif lebih kecil dan pada saat perhitungan dapat diabaikan, sehingga digunakan persamaan (2.39).

$$q_u = q_p = c \times N_c + q \times N_q \quad (2.39)$$

Untuk tanah lempung digunakan persamaan (2.40) dibawah ini.

$$q_p = c \times N_c \quad (2.40)$$

Sedangkan, persamaan (2.41) untuk mencari daya dukung ujung tanah pasir.

$$q_p = q \times N_q \quad (2.41)$$

2. Daya dukung selimut

Daya dukung selimut tiang dapat dihitung menggunakan persamaan (2.42).

$$q_s = \sum p \times \Delta l \times (\alpha \times c_u) + \sum p \times \Delta l \times (K \times \sigma_v' \times \tan \delta) \quad (2.42)$$

Persamaan (2.43) untuk menentukan daya dukung selimut tiang tanah lempung.

$$q_s = \sum p \times \Delta l \times (\alpha \times c_u) \quad (2.43)$$

Untuk tanah pasir dapat menggunakan persamaan (2.44).

$$q_s = \sum p \times \Delta l \times (K \times \sigma_v' \times \tan \delta) \quad (2.44)$$

Dimana:

p : Keliling tiang

Δl : Panjang segmen tiang

α : Faktor adhesi

c_u : Kohesi *undrained*

K : Koefisien tanah lateral

σ_v' : Tegangan vertikal efektif

$\tan \delta$: Sudut geser antara tiang dan tanah

2.7.1 Daya Dukung Tiang Tunggal

Daya dukung tiang tunggal berdasarkan jenisnya terbagi menjadi daya dukung selimut dan daya dukung ujung. Sedangkan menurut jenis tanah persamaan untuk menentukan daya dukung tiang dibagi menjadi tiang bor pada tanah granuler dan tanah lempung.

2.7.1.1 Tiang Bor pada Tanah Granuler

A. Daya Dukung Selimut Tiang (Metode Meyerhof)

Penentuan daya dukung selimut tiang pada tanah granuler (pasir) dapat menggunakan data hasil uji penetrasi (N-SPT). Metode Meyerhof (1983) digunakan pada perhitungan selimut tiang bor dengan jenis tanah pasir, perhitungan tahanan gesek ultimit fondasi tiang bor dinyatakan dengan persamaan (2.45).

$$Q_s = 2 \times N\text{-SPT} \times p \times \Delta l \quad (2.45)$$

B. Daya Dukung Ujung Tiang (Metode NAVDOC)

Besar daya dukung ujung fondasi tiang bor pada tanah pasir menurut NAVDOC adalah $1/3 Q_p$ dari tahanan ujung pada fondasi tiang pancang. Meyerhof menganjurkan nilai 40 sebagai nilai m untuk koefisien perlawanan ujung tiang. Persamaan Q_p untuk tiang pancang yang digunakan adalah.

$$Q_p = 40 \times N\text{-SPT}_{av} \times A_p \quad (2.46)$$

Sehingga, persamaan yang digunakan untuk tiang bor dapat dilihat pada persamaan (2.47) Penentuan daya dukung ini menggunakan data N-SPT sebagai parameter perhitungan.

$$Q_p = 40/3 \times N\text{-SPT}_{av} \times A_p \quad (2.47)$$

$$A_p = l \times d \quad (2.48)$$

Parameter N-SPT_{av} merupakan nilai N-SPT rata-rata dari N_1 dan N_2 . Dimana:

N_1 : Nilai N-SPT rata-rata dari dasar ke 10d arah atas tiang

N_2 : Nilai N-SPT rata-rata dari dasar ke 4d arah bawah tiang

2.7.1.2 Tiang Bor pada Tanah Kohesi

Pengeboran tanah menyebabkan perubahan kuat geser tanah lempung, karena pada saat proses pembutaan lubang bor tahanan ujung tiang akan berkurang. Selain itu, tekanan lateral akan berkurang di daerah sekitar dinding lubang bor. Proses pengecoran beton pada lubang bor akan menyebabkan pelunakan tanah lempung dan mengurangi kuat geser tanah. (Hardiyatmo, Christady, 2015).

A. Daya Dukung Selimut Tiang (Metode α)

Analisi daya dukung selimut tiang untuk tanah kohesi (lempung) dapat menggunakan persamaan (2.49).

$$Q_s = \Sigma P \times \Delta l \times f_s \quad (2.49)$$

$$f_s = \alpha C_u \quad (2.50)$$

Berdasarkan hasil uji beban pada fondai tiang bor, O'Neill dan Reese (1999) menyarankan untuk:

$\alpha=0,55$ digunakan apabila $\frac{c_u}{p_r} < 1,5 \Rightarrow c_u < 150 \text{ kPa}$

$\alpha=0,55 - 0,1(\frac{c_u}{p_r} < 1,5)$ digunakan apabila $1,5 \leq c_u/p_r \leq 2,5$

Keterangan:

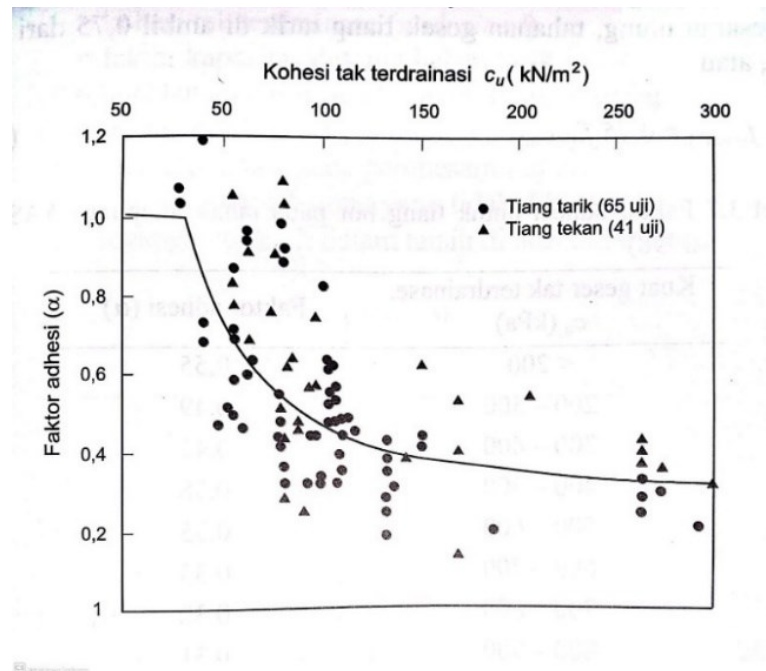
c_u : kohesi tak terdrainase

p_r : tekanan atmosfer atau tekanan referensi (100 kPa)

Pada lapisan lempung retak-retak yang kaku dengan kandungan lanau tinggi, perhitungan kapasitas dukung tiang dilakukan pendekatan awal menggunakan pendekatan empirik. Hubungan N-SPT dengan kohesi tak terdrainase ditunjukkan dalam Tabel 2.21.

Tabel 2.21 Hubungan secara Pendekatan C_u dengan N-SPT untuk Tanah Lempung

No	Nilai pendekatan c_u (kPa)	Peneliti
1	$c_u = 12,5 \text{ N}$	Sanglerat, 1972
2	$c_u = 7 \text{ N}$	O'Neill dan Reese 1976
3	$c_u = 4 - 6 \text{ N}$	Stroud dan Butler 1975
4	$c_u = 6 \text{ N}$	Kulhawy dan Mayne 1990



Gambar 2.13 Hubungan Kohesi tak Terdrainase C_u dan Faktor Adhesi (α) untuk Fondasi Tiang Bor menurut Kulhawy 1984

Tabel 2.22 Faktor Adhesi untuk Tiang Bor pada Tanah Lempung menurut Reese & O'neil, 1988

No	Kuat geser tak terdrainase, C_u (kPa)	Faktor adhesi (α)
1	< 200	0,55
2	200 – 300	0,49
3	300 – 400	0,42
4	400 -500	0,38
5	500 - 600	0,35
6	600 – 700	0,33
7	700 – 800	0,32
8	800 – 900	0,31
9	> 900	Dihitung sebagai batu

B. Daya Dukung Ujung Tiang (Metode Meyerhof)

Menurut Meyerhof (1976) daya dukung ujung tiang bor yang berada pada tanah lempung dapat dinyatakan dengan persamaan (2.51).

$$Q_p = q_p \times A_p \quad (2.51)$$

$$q_p = C_u \times N_c \quad (2.52)$$

Skempton (1966) menyarankan faktor kapasitas dukung yang digunakan pada perhitungan tahanan ujung adalah 9. Sehingga dapat ditulis seperti pada persamaan (2.53)

$$q_p = C_u \times 9 \quad (2.53)$$

2.7.2 Daya Dukung Kelompok Tiang

Beban yang bekerja pada kelompok tiang selain beban struktur atas juga ada beban lain yaitu beban pile cap dan beban tiang. Beban pile cap dapat dihitung menggunakan persamaan (2.54).

$$w = v \times \gamma \quad (2.54)$$

$$v = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \times t \quad (2.55)$$

$$W_g = A_p \times \gamma \times n \times L \quad (2.56)$$

$$P_t = P \times W \times W_g \quad (2.57)$$

Dimana:

w : Berat pile cap

v : Volume pile cap

t : tebal pile cap

W_g : Berat tiang

P_t : Beban total

2.7.2.1 Jumlah dan Jarak Antar Tiang

Penggunaan fondasi tiang umumnya akan dipasang berupa kelompok tiang dibawah *pile cap*. Sehingga dibutuhkan perhitungan mengenai jumlah dan jarak antar tiang fondasi sebelum menghitung daya dukung kelompok tiang.

1. Jumlah Tiang

Jumlah tiang yang dibutuhkan dapat dihitung menggunakan persamaan (2.58).

$$m = \frac{P}{Q_{all}} \quad (2.58)$$

Dimana:

m : Jumlah tiang dalam satu baris

P : Beban yang bekerja

Q_{all} : Kapasitas daya dukung ijin tiang Tunggal

2. Jarak Antar Tiang

Berdasarkan perhitungan daya dukung oleh Dirjen Binamarga Departemen P.U.T.L syarat untuk jarak antar tiang dalam kelompok adalah sebagai berikut:

$$s \leq 2,5d \quad (2.59)$$

$$s \geq 3d \quad (2.60)$$

Dimana:

s : Jarak antar pusat tiang (m)

d : Diameter tiang

2.7.2.2 Efisiensi Kelompok Tiang

Efisiensi penggunaan kelompok tiang dalam suatu perencanaan fondasi didasarkan pada beberapa faktor berikut:

1. Metode pembuatan tiang fondasi tersebut.
2. Dimensi, panjang, jumlah, jarak dan pola penyusunan tiang.
3. Model pembebanan yang dipakai (tahanan dukung ujung tiang terhadap tahanan gesek).
4. Arah beban yang bekerja pada fondasi (aksial atau lateral).
5. Waktu setelah pemasangan tiang.
6. Jenis tanah.
7. Ikatan antara tanah dengan pilecap (penutup tiang).

Salah satu metode menurut Converse-Labaree dapat digunakan sebagai persamaan untuk menghitung efisiensi kelompok tiang ditunjukkan pada persamaan (2.61).

$$\eta = 1 - \frac{1}{1 + \frac{s}{d} \times (n-1)} \quad (2.61)$$

Dimana:

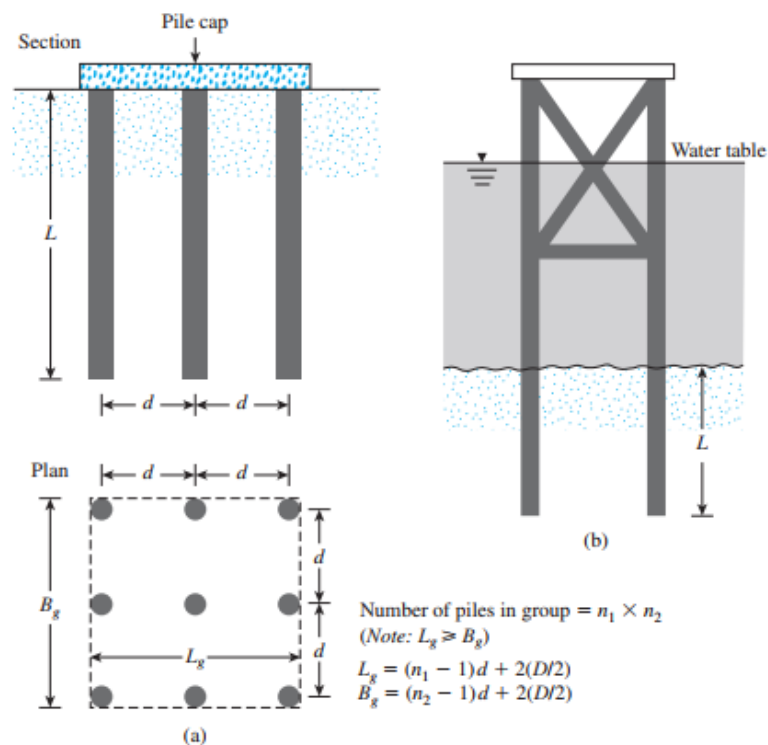
η : Efisiensi kelompok tiang

d : Diameter tiang

s : Jarak pusat ke pusat tiang

n : Jumlah tiang

Sedangkan Feld menyebutkan dalam metodenya bahwa daya dukung fondasi tiang Tunggal pada kelompok tiang akan mengalami penurunan sebanyak 1/16 karena terdapat tiang yang berdampingan (Priadi & Bakar, 2021). Gambar 2.14 menunjukkan bentuk kelompok tiang.



Gambar 2.14 Kelompok Tiang

2.7.2.3 Kapasitas Izin Kelompok Tiang

Kapasitas izin kelompok tiang merupakan besar tahanan yang di izinkan pada tiang untuk menahan beban. Penentuannya dapat menggunakan persamaan (2.62).

$$Q_g = E_g \times n \times Q_{all} \text{ dengan } Q_g > p \quad (2.62)$$

Dimana:

Q_g : Kapasitas izin kelompok tiang

E_g : Efisiensi kelompok tiang

n : Jumlah tiang

Q_{all} : Daya dukung izin

2.8 Faktor Keamanan Fondasi Tiang Bor

Kapasitas maksimum dibagi berdasarkan kapasitas izin tiang dengan faktor aman tertentu. Faktor aman untuk tiang bor diantaranya:

Faktor aman pada dasar tiang dengan pembesaran diameter $d < 2$ m adalah:

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{2,5} \quad (2.63)$$

Faktor aman tiang dengan bagian bawah tidak diperbesar:

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{2} \quad (2.64)$$

Evaluasi kapasitas tiang ijin diperlukan pada saat tiang memiliki diameter (d) lebih dari 2 m dengan pertimbangan besar penurunan tiang. Selain itu, penurunan struktur dicek menyesuaikan syarat besar penurunan izin. (Hardiyatmo, Christady, 2015).

Faktor aman pada fondasi tiang bor didasarkan pada informasi hasil uji beban statis, ketelitian program penyelidikan tanah, dan keseragaman kondisi tanah seperti pada Tabel 2.23. Berdasarkan SNI 8460:2017 faktor aman minimum untuk fondasi dalam adalah 2,5.

Tabel 2.23 Faktor Aman untuk Fondasi Tiang Bor

Informasi dalam Perancangan			Faktor Aman (FK)	
Uji Beban Statis	Kondisi Tanah	Program Penyelidikan Lokasi	Beban ke bawah (Tiang Tekan)	Beban ke atas (Tiang Tarik)
Ya	Seragam	Teliti	2,0*	3,0*
Ya	Tak teratur	Rata-rata	2,5	4,0
Tidak	Seragam	Teliti	2,5	5,0
Tidak	Seragam	Rata-rata	3,0	6,0
Tidak	Tak teratur	Teliti	3,0	6,0
Tidak	Tak teratur	Rata-rata	3,5	6,0

Nilai-nilai faktor aman pada tabel berlaku pada bangunan-bangunan pada umumnya. Sedangkan faktor aman untuk bangunan khusus dapat menggunakan nilai-nilai pada tabel dengan ditambah atau dikurangi. Umumnya faktor keamanan untuk beban tarik akan lebih besar dari beban tekan. Beban tarik dapat menyebabkan keruntuhan segera dan merusak seperti akibat gempa. Oleh karena itu, faktor keamanan yang diterapkan untuk beban tarik fondasi biasanya 1,5 sampai 2 kali dari faktor aman yang dipakai pada beban tekan sesuai dengan yang disarankan para ahli.

2.9 Penurunan Fondasi Tiang Bor

Penurunan (*settlement*) merupakan gerakan titik tertentu pada bangunan terhadap titik referensi tetap. Ketika tiang fondasi mendapat beban, tanah di sekitar lokasi bangunan akan mengalami penurunan yang menyebabkan berkurangnya tinggi tiang fondasi. Perhitungan penurunan dapat dilakukan dengan persamaan sebagai berikut (Hardiyatmo, Christady, 2015). Penurunan pada tanah akibat pembebanan dapat dibagi dua, yaitu.

a. Penurunan elastik/segera (*immediate settlement*)

Penurunan yang diakibatkan oleh deformasi elastis tanah kering, basah, dan jenuh air. Namun kadar air yang ada dalam tanah tidak mengalami perubahan.

b. Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*)

Penurunan ini terjadi akibat adanya perubahan volume tanah karena air yang berada dalam pori-pori tanah keluar dalam jangka waktu tertentu.

2.9.1 Penurunan Tiang Tunggal

Analisis penurunan tiang tunggal dipengaruhi oleh jenis tiang yang digunakan, apakah termasuk tiang friksi atau tiang dukung ujung. Tiang dukung ujung (*end bearing*) merupakan tiang dengan distribusi beban dipindahkan secara langsung ke lapisan tanah dibawah tiang. Sedangkan tiang friksi adalah tiang yang pemindahan bebannya melalui gesekan antara permukaan tiang dengan tanah di sekitarnya. Hal ini terjadi apabila lapisan tanah keras tidak dapat dijangkau atau berada jauh dibawah ujung tiang.

Persamaan (2.65) digunakan untuk penurunan tiang friksi dan persamaan (2.67) untuk tiang dukung ujung.

1. Tiang Friksi

$$S = \frac{QI}{E_s d} \quad (2.65)$$

$$I = I_o R_k R_h R_\mu \quad (2.66)$$

2. Tiang dukung ujung

$$S = \frac{QI}{E_s d} \quad (2.67)$$

$$I = I_o R_k R_b R_\mu \quad (2.68)$$

Dengan,

S = penurunan tiang tunggal

Q = beban yang bekerja

I_o = faktor pengaruh penurunan tiang yang tidak mudah mampat

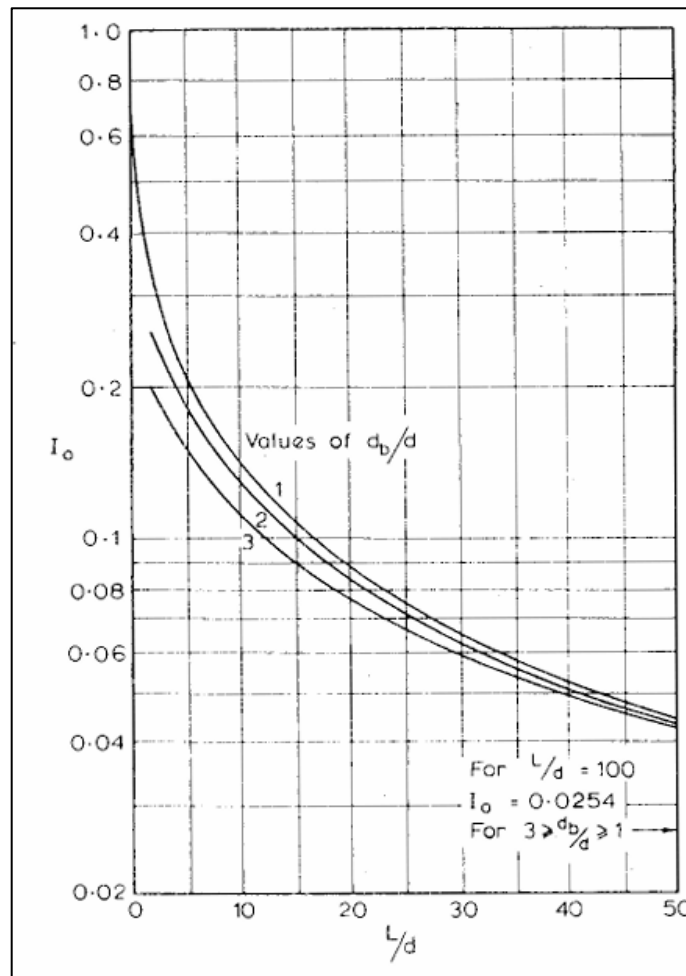
R_k = faktor koreksi kemudah mampatan tiang

R_h = faktor koreksi ketebalan lapisan pada tanah keras

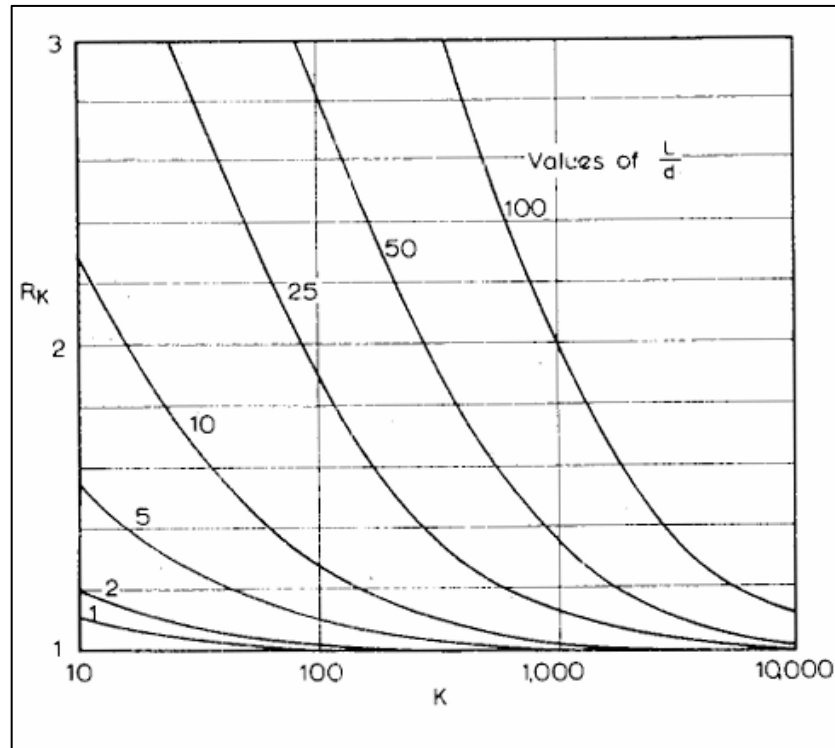
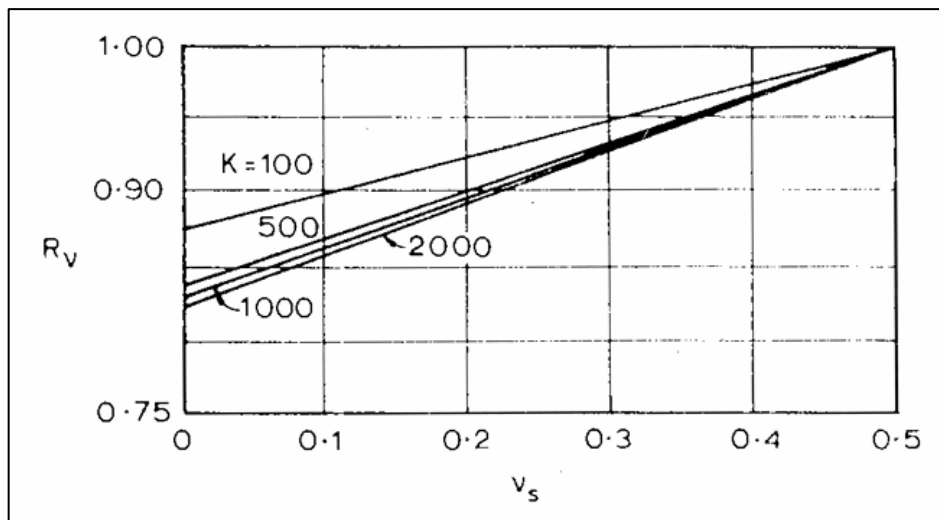
R_μ = faktor koreksi angka poisson μ

R_b = faktor koreksi kekakuan lapisan pendukung

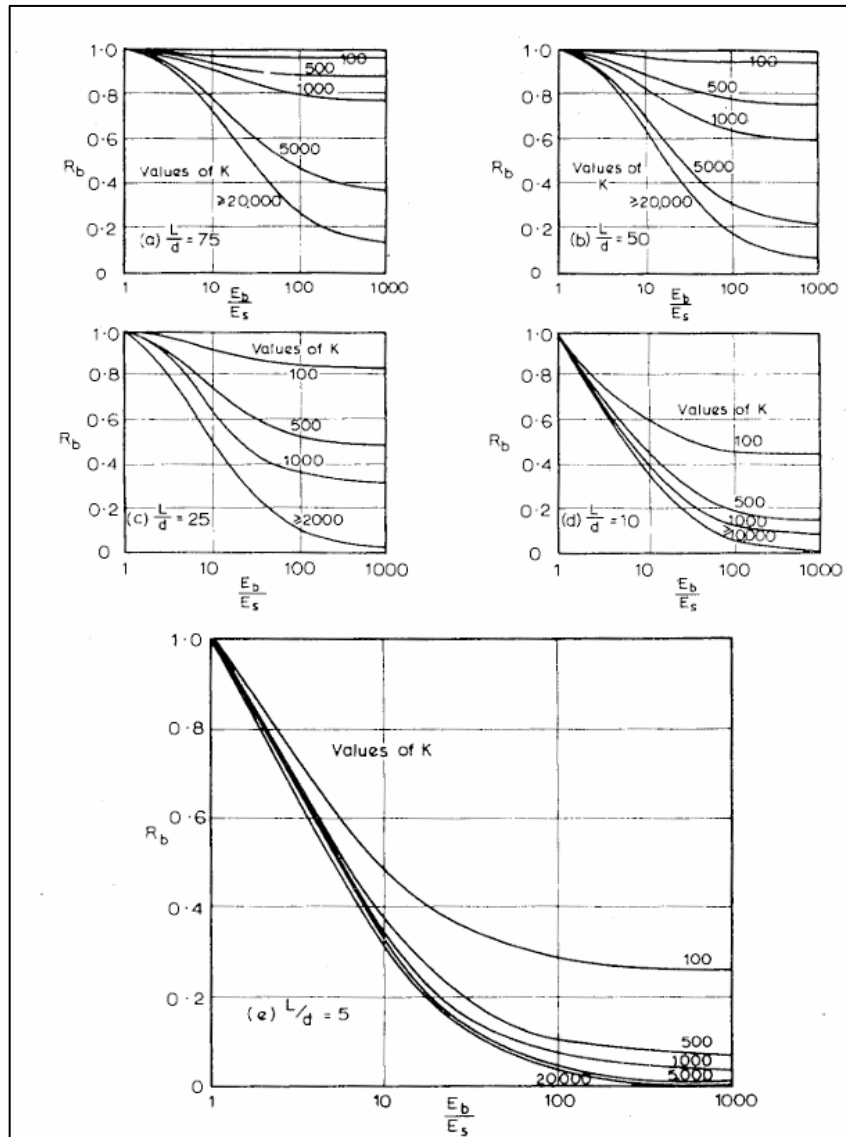
Nilai I_0 didapat dari pembacaan grafik perbandingan dengan L/d seperti pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Faktor Penurunan I_0

Gambar 2.16 Koreksi Kompresi (R_k)

Gambar 2.17 Faktor Koreksi Poisson Rasio



Gambar 2.18 Koreksi Kekakuan Lapisan Pendukung (R_b)

Kekerasan tanah dapat dipengaruhi oleh penurunan, maka diperlukan pengurangan untuk menjaga kekerasan tanah sebagai pendukung dasar tiang. Penurunan akan lebih jelas apabila tiang fondasi relatif lebih pendek dan berada pada lapisan tanah pendukung yang keras (Lambe, William; Whitman, 1980). Pada grafik K merupakan ukuran kompredibilitas relatif tiang dengan tanah, dapat dinyatakan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$K = \frac{E_p R_A}{E_s} \quad (2.69)$$

$$R_A = \frac{A_p}{\frac{1}{4}\pi d^2} \quad (2.70)$$

Dengan,

K : faktor kekuatan tiang

R_A : Rasio luas tiang

E_p : modulus elastisitas tiang

E_s : modulus elastisitas tanah sekitar tiang

A_p : luas tampak tiang

Nilai K akan merurun apabila tiang semakin kompresibel serta nilai R_A untuk tanah dengan konsistensi padat bernilai 1.

2.9.2 Penurunan Izin

Penurunan izin untuk fondasi tiang tunggal dengan beban struktur atas berupa tangki bahan bakar solar diatur dalam API 650 yaitu kurang dari 50 mm. Penurunan pada fondasi kelompok tiang diatur dalam SNI, besar penurunan total dan beda penurunan yang diizinkan ditentukan berdasarkan toleransi struktur atas dan bangunan sekitar yang harus ditinjau berdasarkan masing-masing kasus tersendiri dengan mengacu pada integritas, stabilitas dan fungsi dari struktur diatasnya (Badan Standardisasi Nasional, 2017).

Syarat perbandingan penurunan agar fondasi aman yaitu $S_{izin} \geq S_{total}$, dimana S_{izin} dapat dinyatakan dengan persamaan (2.71).

$$S_{izin} < 15 \text{ cm} + \frac{B_g}{600} \quad (2.71)$$

Dengan,

S_{izin} = Penurunan yang diizinkan (cm)

Persamaan ini digunakan untuk bangunan tinggi dan dapat dibuktikan struktur atas masih aman. Beda penurunan (*differential settlement*) yang diperkirakan akan terjadi 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 bangunan. Besar beda penurunan (*differential settlement*) adalah 1/300 (Badan Standardisasi Nasional, 2017).

2.10 Program Metode Analitik

Program metode analitik merupakan salah satu software yang digunakan dalam bidang geoteknik. Program ini dipakai dalam beberapa jenis analisis diantaranya analisis fondasi, jembatan, dinding penahan tanah, dan timbunan. Analisis fondasi dalam dapat menggunakan program Geo5 Pile untuk tiang tunggal. Data yang digunakan pada program metode analitik yaitu data beban struktur, jenis fondasi, dan parameter tanah. Hasil dari pemodelan ini berupa daya dukung, penurunan (*settlement*), dan faktor keamanan (*safety factor*) desain fondasi (Mina et al., 2018). Analisis fondasi tiang dengan software ini menggunakan metode Navfac dm 7.2 Foundation and Earth Structure, U.S. Department of the Navy 1984. Sedangkan penurunan maksimal yang diterapkan adalah 25 mm berdasarkan standar CSN 73 1002.

Metode NAVFAC dm 7.2 merupakan metode yang berupa pendekatan sistematis dalam perhitungan daya dukung fondasi dengan mempertimbangkan konsistensi tanah dan beban. Hasil dari analisis ini berupa tahanan ujung (R_b) dan tahanan selimut (R_s), pada tanah non-kohefif program ini memperhitungkan kedalaman kritis.

- Tahanan Ujung Tiang

Tahanan ujung untuk tanah non-kohefif dihitung menggunakan persamaan (2.72), dengan faktor daya dukung didapat secara langsung dari program.

$$R_b = \sigma_{efb} \times N_q \times A_b \quad (2.72)$$

Dengan,

σ_{efb} : Tegangan efektif pada dasar tiang

N_q : Faktor Daya Dukung

A_b : Luas dasar tiang

Sedangkan, tahanan ujung untuk tanah kohefif perhitungannya menggunakan persamaan (2.73).

$$R_b = 9 \times C_u \times A_b \quad (2.73)$$

- Tahanan Selimut Tiang

Persamaan (2.74) yang digunakan untuk perhitungan tahanan selimut tiang pada tanah non-kohefif.

$$R_s = \sum_{j=1}^n K_j \times \sigma_{ef,j} \times \text{tg} \delta_j \times A_{s,j} \quad (2.74)$$

Dengan,

K_j : Koefisien tekanan tanah lateral pada lapisan ke-j

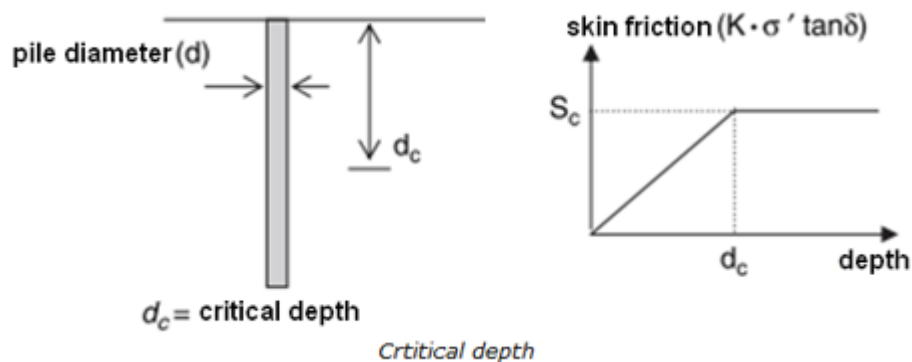
$\sigma_{ef,j}$: Tegangan efektif tanah lapisan ke-j

δ_j : Sudut gesek tiang (material tiang dan tanah sekitar di lapisan ke-j)

$A_{s,j}$: Luas selimut tiang pada lapisan ke-j

Koefisien tekanan tanah lateral dihitung oleh program. Pada tanah non-kohefif gesekan selimut tiang tidak bertambah secara terus menerus. Namun, pada kedalaman tertentu nilainya akan konstan seperti pada Gambar 2.19. Pada tanah pasir lunak kedalaman kritis adalah 10d, sedangkan untuk tanah pasir *medium* dan *compact* nilai kedalaman kritisnya 15d dan 20d. Koefisien kedalaman kritis ditentukan dengan persamaan (2.75).

$$d_c = k_{dc} \times d \quad (2.75)$$



Gambar 2.19 Kedalaman Kritis

Pada tanah kohefif tahanan selimut tiang menggunakan persamaan (2.76) .

$$R_s = \sum_{j=1}^n \alpha_j \times c_{u,j} \times A_{s,j} \quad (2.76)$$

Dengan,

α_j : Koefisien tahanan gesek pada lapisan ke-j

$c_{u,j}$: Kohesi

Pemodelan pada program metode analitik membutuhkan beberapa parameter tanah, diantaranya:

1. Berat isi normal (γ_b)
2. Berat isi saturasi (γ_{sat})
3. Kohesi (c_u)
4. Sudut Gesek Dalam (ϕ')
5. Koefisien daya dukung (β_p)
6. Poisson Rasio (μ)
7. Faktor Adhesi (α)
8. Modulus Oedometrik (E_{oed})
9. Modulus Deformasi (E_{def})

Modulus Oedometrik dihitung untuk setiap lapisan tanah dengan menggunakan persamaan (2.77) dibawah ini. E_{oed} juga dapat ditentukan berdasarkan kurva Oedometrik (hubungan tegangan regangan) secara langsung pada program Program metode analitik.

$$E_{oed} = \frac{E_{def}}{\beta_p} \quad (2.77)$$

$$E_{def} = 500 \times C_u \quad (2.78)$$

$$\beta_p = 1 - \frac{2 \times \mu^2}{1 - \mu} \quad (2.79)$$