

2 LANDASAN TEORI

2.1 Tanah

Dalam pandangan teknik sipil, tanah adalah himpunan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang relatif lepas (*loose*), yang terletak di atas batuan dasar (*bedrock*) (Hardiyatmo, 2003). Tanah adalah material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai zat cair juga gas yang mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel-partikel padat tersebut (Das & Sobhan, 2012).

Umumnya tanah dibagi menjadi dua yaitu lengket (kohesif) dan tidak lengket (non kohesif). Tanah tidak lengket adalah tanah yang lengas karena adanya tegangan permukaan dalam air, seperti pasir. Tanah lengket merupakan tanah yang bercampur dan mengering, seperti tanah liat/lempung (Bowles, 1991).

2.2 Penyelidikan Tanah

Penyelidikan tanah bertujuan untuk memperoleh gambaran mengenai kondisi stratifikasi tanah dan parameter yang dimiliki tanah. Penyelidikan tanah dilakukan untuk mendapatkan data tanah sebagai perencanaan konstruksi suatu proyek.

2.2.1 *Standard Penetration Test*

Standard Penetration Test bertujuan untuk memperoleh parameter perlawanan penetrasi lapisan tanah di lapangan. Parameter tersebut diperoleh dari jumlah pukulan terhadap penetrasi konus, digunakan untuk mengidentifikasi per lapisan tanah yang merupakan bagian dari desain fondasi (Badan Standardisasi Nasional, 2008). *Standard Penetration Test* (SPT) dilakukan pada setiap lubang bor teknik dengan interval 2 m. Pelaksanaan SPT mengacu pada SNI 4153:2008 dan ASTM D-1586-67 (ASTM International, 1967)

2.2.2 Pengujian Laboratorium

Pengujian laboratorium dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh informasi geoteknik berupa parameter fisik dan mekanika tanah untuk kebutuhan desain bangunan yang aman dan ekonomis. Hasil pengujian akan memberikan dasar untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasikan serta mengevaluasi karakteristik kekuatan dan kompresibilitas lapisan tanah (Badan Standardisasi Nasional, 2017). Jenis-jenis pengujian yang dilakukan di laboratorium meliputi pengujian:

1. Uji Kadar Air (*Water Content Test*)
2. Uji Berat Jenis Partikel (*Specific Gravity Test*)
3. Uji Analisis Ukuran Butir (*Grain Size Analysis*)
4. Uji Batas Atterberg (*Atterberg Limits Test*)
5. Uji Pemadatan (*Proctor Test*)
6. Uji Geser Langsung (*Direct Shear Test*)
7. Uji Triaxial (*Triaxial Compression Test*)
8. Uji Konsolidasi (*Consolidation Test*)

2.3 Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah adalah pengelompokan tanah berdasarkan kesamaan yang terkait dengan morfologi, fisika, kimia, jenis dan sifat mineralogi. Umumnya, klasifikasi tanah didasarkan atas ukuran partikel yang diperoleh dari analisis saringan (dan uji sedimentasi) dan plastisitas. Terdapat dua sistem klasifikasi yang sering digunakan, yaitu *Unified Soil Classification System* dan *AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)* (Hardiyatmo, 2002).

2.3.1 Klasifikasi Tanah *Unified Soil Classification System* (USCS)

Dalam Sistem *Unified*, tanah lolos saringan nomor 200 kurang dari 50% diklasifikasikan ke dalam tanah berbutir kasar (kerikil dan pasir), jika lebih dari 50% diklasifikasikan sebagai tanah berbutir halus (lanau/lempung) (Hardiyatmo, 2002). Tanah diklasifikasikan dalam kelompok dan subkelompok. Simbol yang digunakan untuk klasifikasi tanah termasuk:

- 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 ang highlyorganic soil*)
- W : Gradasi baik (*well-graded*)
- P : Gradasi buruk (*poorly-graded*)
- H : Plastisitas Tinggi (*high-plasticity*)
- L : Plastisitas rendah (*low-plasticity*)

Klasifikasi tanah berdasarkan *Unified Soil Classification System* (USCS) terdapat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sistem Klasifikasi *Unified Soil Classification System* (USCS)

Divisi Utama			Simbol Kelompok	Nama Jenis		Kriteria Labotarorium		
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 kerikil-pasir, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	Klasifikasi berdasarkan persentase butiran halus; Kurang dari 5% lolos saringan no. 200 : GM, GP, SW, SP. Lebih dari 12% lolos saringan no. 200 : GM, GC SM, SC. 5% - 12% lolos saringan no. 200 : Batasan	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4 \quad C_u = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{10}} \text{ antara 1 dan 3}$		
			GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran kerikil-pasir, atau tidak mengandung butiran halus		Tidak memenuhi kriteria GW		
		Kerikil banyak kandungan butiran halus	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lempung		Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau PI<4	Bila batas <i>Atterberg</i> berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol ganda	
			GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung		Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau PI>7		
			SW	Pasir bergradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus		$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6 \quad C_u = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{10}} \text{ antara 1 dan 3}$		

Divisi Utama			Simbol Kelompok	Nama Jenis		Kriteria Labotarorium	
	Pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos saringan no 4 (4,75 mm)	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	SP	Pasir bergradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus		Tidak memenuhi kriteria SW	
		Kerikil banyak kandungan butiran halus	SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau		Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI<4$	Bila batas <i>Atterberg</i> berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol ganda
			SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung		Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI>7$	
Tanah berbutir halus 50% atau lebih tertahan 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				
		CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus (<i>lean clays</i>)				

Divisi Utama		Simbol Kelompok	Nama Jenis	Kriteria Laboratorium
Tanah berbutir halus 50% atau lebih tertahan saringan no 200 (0,075 mm)		OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah	
	Lanau dan lempung batas cair > 50%	MH	Lanau tak organik atau pasir halus diatomae, atau lanau diatomae, lanau yang elastis	
		CH	Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk (<i>fat clays</i>)	
		OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai dengan tinggi	
Tanah dengan kadar organik tinggi		PT	Gambut (<i>peat</i>) dari tanah lain dengan kandungan organik tinggi	Manual untuk identitas visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488

Sumber: (Hardiyatmo, 2002)

2.3.2 Klasifikasi Tanah *American Association of Highway and Transportation Officials* (AASHTO)

Menurut (Hardiyatmo, 2002) sistem klasifikasi AASHTO (*American Association of Highway and Transportation Officials*) berguna untuk menentukan kualitas tanah untuk perencanaan timbunan jalan, *subbase* dan *subgrade*. Sistem klasifikasi AASHTO membagi tanah ke dalam 8 kelompok, A-1 sampai A-8 termasuk sub-sub kelompok. Tanah-tanah dalam tiap kelompoknya dievaluasi terhadap indeks kelompoknya yang dihitung dengan rumus-rumus empiris. Pengujian yang digunakan adalah analisis saringan dan batas-batas *Atterberg*.

Indeks kelompok digunakan untuk mengevaluasi lebih lanjut pada tanah yang ada dalam kelompoknya. Indeks kelompok dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.1).

$$GI = (F - 35) [0,2 + 0,005 (LL - 40) + 0,01(F - 15) (PI - 10)] \quad (2.1)$$

Dimana:

GI : Indeks kelompok

F : Persen butiran lolos saringan no. 200 (0,075 mm)

LL : Batas cair

PI : Indeks plastisitas

Sistem klasifikasi *American Association of Highway and Transportation Officials* (AASHTO) terdapat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Sistem Klasifikasi (AASHTO)

Klasifikasi Umum	Material Granular (≤ 35% Lolos Saringan No. 200)							Tanah Lanau – Tanah Lempung (> 35% Lolos Saringan No. 200)			
Klasifikasi Kelompok	A – 1		A – 3	A – 2				A – 4	A – 5	A – 6	A – 7
	A – 1a	A – 1b		A – 2 – 4	A – 2 – 5	A – 2 – 6	A – 2 – 7				A – 7 – 5 ^a A – 7 – 5 ^b
Analisis Saringan (% lolos)											
No. 10	50 maks	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
No. 40	30 maks	50 maks	51 min	-	-	-	-	-	-	-	-
No. 200	15 maks	25 maks	10 maks	35 maks	35 maks	35 maks	35 maks	35 maks	35 maks	35 maks	35 maks
Sifat Fraksi Lolos Saringan No. 40											
Liquid Limit (LL)	-	-	40 maks	40 maks	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min	41 min
Plasticity Index (PI)	6 maks	NP	10 maks	10 maks	11 min	11 min	10 maks	10 maks	11 min	11 min	11 min
Tipe material pokok pada umumnya	Pecahan batu, kerikil, dan pasir		Pasir halus	Kerikil berlanau atau berlempung dan pasir				Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian umum sebagai tanah dasar	Sangat baik sampai baik							Sedang sampai buruk			

Catatan: Kelompok A – 7 dibagi atas A – 7 – 5 dan A – 7 – 6 bergantung pada batas plastisnya (PL)

Untuk $PL > 30$, klasifikasi A – 7 – 5

Untuk $PL < 30$, klasifikasi A – 7 – 6

Np = non plastis

Sumber: (Hardiyatmo, 2002)

2.4 Parameter Tanah

Parameter tanah adalah ukuran atau acuan untuk mengetahui atau menilai hasil suatu proses perubahan yang terjadi dalam tanah baik dari sifat fisik dan jenis tanah. Parameter suatu tanah didapat dengan melakukan pengujian tanah di laboratorium dan di lapangan. Parameter ini juga dimanfaatkan untuk membantu perhitungan rencana lainnya yang memerlukan data-data tanah baik berupa sifat fisik maupun sifat kimianya.

2.4.1 Berat Isi Tanah (γ)

Berat isi tanah (γ) merupakan perbandingan berat tanah dengan volume tanah. Tujuan dari pengujian ini yaitu untuk mengetahui kepadatan suatu tanah.

Tabel 2.3 Berat Isi Tanah Berdasarkan Jenis Tanah

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

Sumber: (Budhu, 2010)

2.4.2 Kohesi (C_u)

Kohesi (C_u) 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. Nilai kohesi dapat diperoleh secara langsung melalui pengujian laboratorium, seperti uji triaxial, uji kuat tekan bebas, dan uji geser langsung. Selain itu, kohesi juga dapat diperkirakan secara empiris berdasarkan hasil uji lapangan, seperti *Standard Penetration Test* (SPT). Salah satu korelasi yang umum digunakan adalah Persamaan (2.2) sebagaimana dikemukakan oleh (Look, 2007). Nilai konstanta 5 merupakan nilai empiris yang diperoleh dari pengamatan dan kalibrasi pada kondisi tanah tertentu, sehingga tidak bersifat universal.

$$C_u = 5 \times N_{\text{SPT}} \quad (2.2)$$

2.4.3 Sudut Geser (ϕ)

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

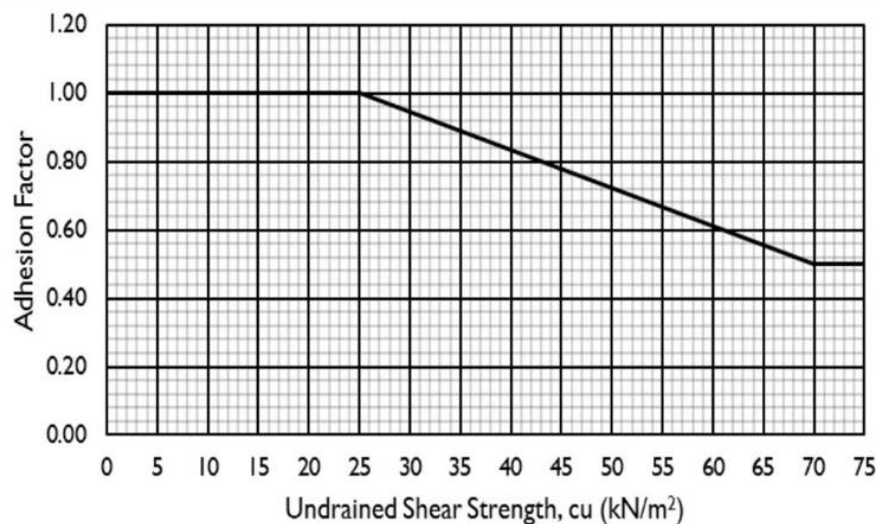
Tabel 2.4 Korelasi q_c dan D_r dengan Sudut Geser dalam Tanah

<i>State Of Packing</i>	<i>Relative Density</i>	N_{SPT}	q_c , (MPa)	<i>Approximate Triaxial Friction Angle (Degrees)</i>
<i>Very loose</i>	<0,2	<4	<2	<30
<i>Loose</i>	0,2-0,4	4-10	2-4	30-35
<i>Medium dense</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

Sumber: (Look, 2007)

2.4.4 Adhesion Factor (α)

Nilai faktor adhesi (α) merupakan nilai untuk analisis daya dukung selimut dari tiang fondasi yang tertanam dalam tanah kohesif atau tanah lempung. Nilai α didapatkan dari grafik API RP2A (American Petroleum Institute, 1987) dimana hubungan C_u dan α menunjukkan bahwa nilai α akan menurun seiring dengan meningkatnya nilai C_u .



Gambar 2.1 Grafik Faktor Adhesi Metode API RP2A

Sumber: (American Petroleum Institute, 1987)

2.4.5 Koefisien Tekanan Tanah Lateral (K_o)

Koefisien tekanan tanah lateral (K_o) adalah perbandingan antara tegangan horizontal efektif terhadap tegangan vertikal efektif dalam kondisi tanah diam, artinya tanah tidak mengalami perubahan lateral. Nilai K_o menunjukkan seberapa besar tekanan tanah horizontal yang bekerja terhadap suatu struktur saat tanah stabil atau tidak terganggu.

Koefisien tekanan tanah lateral (K_o) merupakan nilai koefisien tekanan tanah lateral pada lapisan atas dan bawah tanah pasir. Dalam metode API RP2A disarankan nilai K_o 0,8 untuk tiang pancang dengan pipa terbuka atau *open ended piles*, dan nilai K_o 1,0 direkomendasikan untuk tiang dengan perpindahan penuh atau *full displacement piles*.

2.4.6 Faktor Daya Dukung (N_q)

Faktor daya dukung ujung (N_q) merupakan parameter yang digunakan untuk menghitung kapasitas ujung tiang pada tanah granular. N_q menunjukkan kontribusi tekanan vertikal efektif terhadap kekuatan ujung fondasi.

Tabel 2.5 Nilai Faktor Daya Dukung Ujung

<i>Soil</i>	N_q	<i>Limiting q, (MPa)</i>
<i>Very loose to medium, sand to silt</i>	8	40 (1,9)
<i>Loose to dense, sand to silt</i>	12	60 (2,9)
<i>Medium to dense, sand to sand-silt</i>	20	100 (4,8)
<i>Dense to very dense, sand to sand-silt</i>	40	200 (9,6)
<i>Dense to very dense, gravel to sand</i>	50	250 (12,0)

2.4.7 Strain Factor (ϵ_{50})

Nilai ϵ_{50} atau faktor regangan 50 adalah regangan yang terjadi ketika tanah mencapai 50% dari tegangan maksimumnya. Parameter ϵ_{50} biasanya diperoleh dari hasil uji laboratorium berupa grafik hubungan antara tegangan dan regangan tanah. Nilai ϵ_{50} dipengaruhi oleh tingkat konsistensi tanah lempung.

Dalam metode p-y, nilai ϵ_{50} digunakan untuk menganalisis bentuk dan kekakuan grafik py, yang menggambarkan hubungan antara tekanan tanah lateral dan defleksi tiang.

Tabel 2.6 Nilai Strain Factor ϵ_{50}

<i>Soil</i>	ϵ_{50}
<i>Soft Clay</i>	0,02
<i>Medium Clay</i>	0,01
<i>Stiff Clay</i>	0,007

<i>Soil</i>	ϵ_{50}
<i>Very Stiff Clay</i>	0,005
<i>Hard Clay</i>	0,004
<i>Limestone</i>	0,001

2.4.8 Modulus Tanah Lateral (k)

Soil modulus parameter, atau nilai k , merupakan ukuran kekakuan tanah terhadap pergerakan lateral tiang pancang. Parameter ini digunakan untuk menentukan kemiringan awal grafik p_y , yang menggambarkan hubungan antara tekanan tanah lateral dan defleksi tiang. Semakin besar nilai k , semakin kaku respons tanah, sehingga grafik p_y menjadi lebih curam dan tiang mengalami defleksi yang lebih kecil untuk tekanan yang sama.

Tabel 2.7 Modulus Tanah Lateral (k) Pada Tanah Lempung

<i>Soil</i>	<i>Static (kPa/m)</i>	<i>Cyclic (kPa/m)</i>
<i>Soft Clay</i>	8.140	-
<i>Medium Clay</i>	27.150	-
<i>Stiff Clay</i>	136.000	54.300
<i>Very Stiff Clay</i>	271.000	108.500
<i>Hard Clay</i>	543.000	217.000

Tabel 2.8 Modulus Tanah Lateral (k) Pada Tanah Pasir

<i>Soil</i>	<i>Submerged Sand (kPa/m)</i>	<i>Sand Above WT (kPa/m)</i>
<i>Loose</i>	5.430	6.790

<i>Soil</i>	<i>Submerged Sand (kPa/m)</i>	<i>Sand Above WT (kPa/m)</i>
<i>Medium</i>	16.300	24.430
<i>Dense</i>	33.900	61.000

2.5 Kelas Situs

Klasifikasi kelas situs dilakukan untuk mengetahui seberapa besar percepatan gempa maksimum yang terjadi dari dasar batuan sampai permukaan tanah. Penentuan kelas situs didasarkan pada profil tanah bagian atas hingga kedalaman 30 m, yang diperoleh melalui penyelidikan di lapangan dan laboratorium. Setiap jenis kelas situs memiliki syarat tertentu sebagai dasar dalam penentuannya. Kriteria kelas situs dapat dilihat pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Klasifikasi Kelas Situs

Kelas Situs	V_s (m/detik)	N atau N_{ch}	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 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$ 3. Kuat geser niralir, $s_u < 25$ kPa		

Kelas Situs	V_s (m/detik)	N atau N_{ch}	s_u (kPa)
SF (tanah khusus yang membutuhkan investasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: – Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti likuefaksi, lempung sangat sensitive, tanah tersementasi lemah – Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan, $H > 3$ m) – Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan, $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas, $PI > 75$) – Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan – ketebalan $H > 35$ m dengan $s_u < 50$ kPa		

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional, 2017)

Nilai rata-rata tahanan penetrasi lapangan dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.3) sebagai berikut:

$$N_{ave} = \frac{\sum d_i}{\sum d_i / N_i} \quad (2.3)$$

Dimana:

d_i = Tebal total lapisan tanah

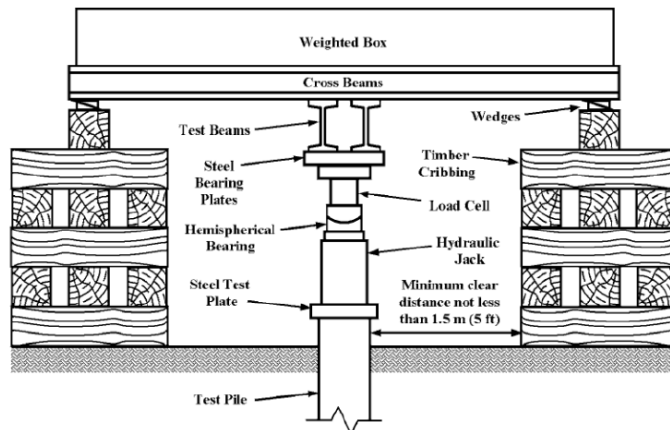
N_i = Tahanan penetrasi (N_{SPT})

2.6 Static Loading Test

Static Loading Test (SLT) adalah uji pembebanan statik yang digunakan untuk menentukan beban yang dapat didukung fondasi. Pengujian *Static Loading Test* (SLT) dilakukan untuk menentukan kapasitas total tiang dibandingkan dengan penurunan tiang tersebut (Kusuma et al., 2022).

Static loading test adalah metode pengujian yang digunakan untuk memastikan struktur dapat menahan beban maksimum yang direncanakan tanpa mengalami kerusakan atau deformasi yang berlebihan. Pengujian ini dilakukan

dengan menambahkan beban secara bertahap pada tiang hingga mencapai beban tertentu, lalu mengukur penurunan yang terjadi pada tiang tersebut. Pengujian pembebanan statik lateral (*lateral static loading test*) pada fondasi tiang dilakukan berdasarkan (ASTM International, 2007a) (Hidayat et al., 2019), dan (ASTM International, 2007b) untuk pengujian pembebanan statik aksial (Kosasi et al., 2022).



Gambar 2.2 Pengujian *Static Loading Test* (SLT)

Sumber: (ASTM International, 2007b)

Tahapan pelaksanaan uji *Static Loading Test* (SLT) dimulai dengan meratakan tanah di lokasi pengujian dan permukaan fondasi tempat pelat uji agar tegak lurus terhadap sumbu tiang. *Test beam* dipasang tegak lurus terhadap sumbu tiang, sementara *cross beam* diposisikan melintang untuk mendistribusikan beban. *Concrete block* disusun di atas sistem reaksi hingga mencapai beban rencana. *Hydraulic jack* ditempatkan di tengah kepala tiang untuk menekan *test beam*, sehingga menghasilkan gaya aksial pada tiang uji. *Dial gauge* dipasang pada profil pengukuran untuk mencatat penurunan tiang selama proses pembebanan.

2.6.1 Interpretasi Pengujian *Static Loading Test* (SLT) Metode Davisson

Interpretasi hasil uji *Static Loading Test* metode (Davisson, 1972) dilakukan dengan membaca grafik beban penurunan untuk memperkirakan beban ultimit yang menyebabkan keruntuhan tiang. Metode ini disarankan Davisson sebagai beban yang sesuai dengan gerakan yang melebihi tekanan elastis (yang diasumsikan oleh kolom yang berdiri sendiri) pada nilai 0,15 inci dan faktor yang relevan dengan

pengukuran tiang dibagi 120 (Octavia, 2020). Tahapan penentuan beban ultimit fondasi tiang dengan metode Davisson sebagai berikut:

1. Gambarkan grafik beban-penurunan sesuai hasil *Static Loading Test*.
2. Tentukan penurunan elastis.
3. Gambarkan garis OA berdasarkan persamaan penurunan elastis.
4. Gambarkan garis BC yang sejajar dengan OA pada jarak sejauh x.
5. Beban runtuh ditentukan dari perpotongan garis BC pada grafik beban-penurunan.

Untuk menentukan penurunan elastis dapat menggunakan Persamaan (2.4).

$$\Delta = \frac{QL}{AE} \quad (2.4)$$

$$A = \pi r^2 \quad (2.5)$$

Dimana:

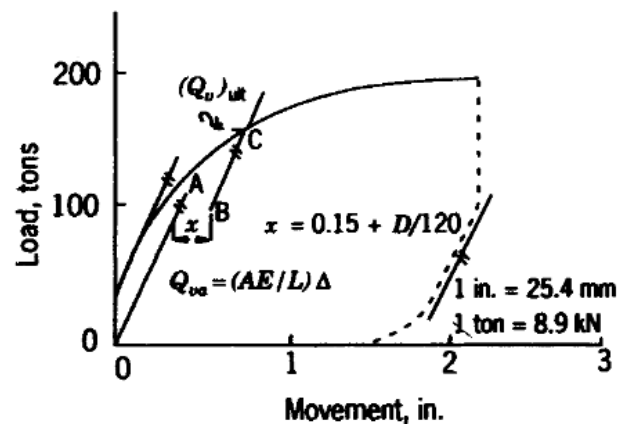
- Q = Beban yang digunakan
 L = Panjang tiang
 A = Luas penampang tiang
 E = Modulus elastisitas tiang

Jarak garis BC yang sejajar dengan garis OA dapat menggunakan Persamaan (2.6).

$$x = 0,15 \times \frac{D}{120} \quad (2.6)$$

Dimana:

- D = Diameter tiang dalam inci



Gambar 2.3 Grafik Interpretasi Beban-Penurunan Metode Davisson

Sumber: (Prakash, 2008)

2.6.2 Interpretasi Pengujian *Static Loading Test* (SLT) Metode Chin

Berdasarkan asumsi bahwa hanya deformasi geser yang terjadi dan grafik beban-penurunan berbentuk hiperbola, maka grafik $\Delta/Q_{va} - \Delta$ merupakan garis lurus yang miring letaknya. Tahapan penentuan daya dukung beban ultimit fondasi tiang dengan metode (F.K.Chin, 1970) sebagai berikut:

1. Gambar grafik penurunan dan rasio penurunan terhadap beban sesuai Persamaan (2.7)
2. Beban ultimit dapat ditentukan dengan Persamaan (2.8).
3. Grafik beban-penurunan mendekati hiperbolis seperti pada Gambar 2.4.

$$\Delta/Q \quad (2.7)$$

$$Q_{ult} = \frac{1}{C_1} \quad (2.8)$$

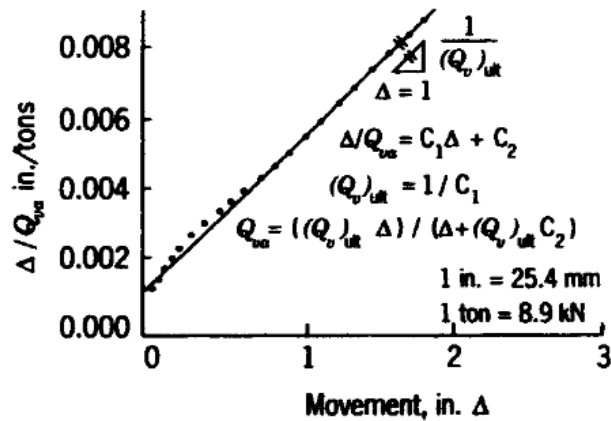
Dimana:

Q_{ult} = Daya dukung ultimit

Q = Beban

Δ = Penurunan

C_1 = Konstanta regresi dari persamaan linear



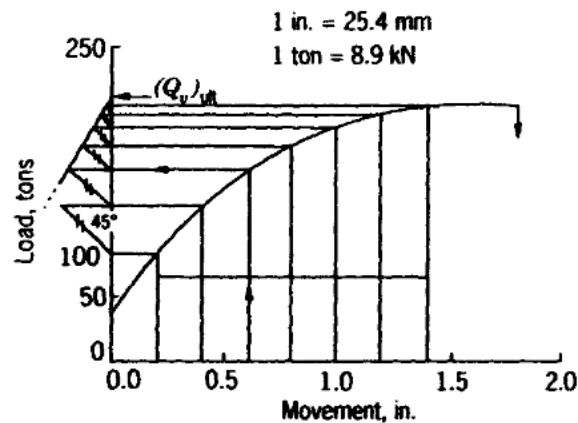
Gambar 2.4 Grafik Interpretasi Beban-Penurunan Metode Chin

Sumber: (Prakash, 2008)

2.6.3 Interpretasi Pengujian *Static Loading Test* (SLT) Metode Mazurkiewicz

Metode (Mazurkiewicz, 1972) diasumsikan berdasarkan kapasitas tahanan ultimit dapat diperoleh dari beban yang berpotongan. Tahapan penentuan daya dukung beban ultimit fondasi tiang dengan metode Mazurkiewicz sebagai berikut:

1. Plot grafik beban terhadap penurunan.
2. Tarik garis vertikal dari beberapa titik penurunan yang dipilih hingga memotong grafik, kemudian tarik garis horizontal hingga memotong sumbu beban.
3. Dari perpotongan setiap beban tersebut, dibuat garis 45° terhadap garis perpotongan berikutnya dan seterusnya.
4. Hubungkan titik yang terbentuk hingga menghasilkan sebuah garis lurus.
5. Perpotongan garis lurus dengan sumbu beban merupakan beban ultimit.



Gambar 2.5 Grafik Interpretasi Beban-Penurunan Metode Mazurkiewicz

Sumber: (Prakash, 2008)

2.7 Fondasi

Fondasi adalah bagian struktur bawah bangunan yang meneruskan beban yang dipikul oleh fondasi dan beratnya sendiri ke dalam tanah di bawahnya (Bowles, 1997) .

Fondasi sebagai struktur bawah yang biasanya terletak di bawah permukaan tanah, berfungsi menahan beban dari struktur bangunan di atasnya dan menyalurkan gaya yang diterima ke lapisan tanah pendukung. Fondasi harus diposisikan pada tanah yang cukup keras, padat dan kuat agar mampu bekerja dengan baik dan penurunan yang terjadi tidak mengganggu struktur di atasnya.

2.7.1 Klasifikasi Fondasi

Fondasi dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu fondasi dangkal dan fondasi dalam. Menurut (Bowles, 1997) fondasi dapat diklasifikasikan berdasarkan dimana beban dibawa oleh tanah. Fondasi dangkal apabila kedalaman fondasi (D) relatif kecil dibandingkan dengan lebar fondasi (B), umumnya jika $D/B < 1$. Sebaliknya, fondasi dalam digunakan ketika kedalaman fondasi (D) lebih besar dibandingkan dengan lebar fondasi (B), umumnya jika $D/B > 4$.

1. Fondasi Dangkal

Fondasi dangkal, yang juga dikenal sebagai *shallow foundation*, adalah tipe fondasi yang bertujuan untuk menyalurkan beban bangunan langsung ke tanah pada kedalaman yang tidak terlalu dalam. Fondasi ini umumnya diterapkan ketika tanah di permukaan memiliki daya dukung yang cukup untuk menopang bangunan di atasnya. Beberapa jenis fondasi dangkal, yaitu:

a. Fondasi Telapak (*Spread Footing*)

Digunakan untuk menopang kolom tunggal dan biasanya terbuat dari beton bertulang. Bentuknya menyerupai telapak dan memiliki tebal yang dapat disesuaikan ukurannya.

b. Fondasi Memanjang (*Continuous Footing*)

Fondasi memanjang umumnya disebut dengan fondasi batu kali yang dirancang untuk menopang kolom dengan jarak dekat. Fondasi ini menyalurkan beban bangunan pada dinding ke lapisan tanah secara merata.

c. Fondasi Rakit (*Raft Foundation*)

Fondasi rakit sering digunakan pada daerah tanah lunak, karena daya dukung tanahnya yang rendah dan diperlukam fondasi dengan bentuk yang relatif lebar.

d. Fondasi Sarang Laba-Laba

Fondasi yang terdiri dari kombinasi fondasi beton dangkal yang diisi seluruhnya dengan dengan perbaikan tanah lunak sampai menghasilkan komposit dari konstruksi beton bertulang.

2. Fondasi Dalam

Fondasi dalam, yang juga dikenal sebagai *deep foundation*, adalah tipe fondasi yang mentransfer beban struktur ke lapisan tanah yang lebih dalam, yang memiliki kapasitas dukung lebih tinggi dibandingkan tanah permukaan. Fondasi dalam merupakan jenis fondasi yang dirancang apabila letak tanah keras relatif lebih dalam yang dimulai dari atas permukaan tanah.

a. Fondasi Tiang (*Pile Foundation*)

Fondasi tiang adalah jenis fondasi yang digunakan ketika lapisan tanah kuat berada jauh di bawah permukaan. Fondasi tiang bertujuan untuk menyalurkan beban bangunan dapat diteruskan melalui tanah yang relatif lunak hingga mencapai lapisan tanah keras pada kedalaman tertentu, sehingga memberikan daya dukung yang maksimal. Berdasarkan metode pelaksanaannya, fondasi tiang dibagi menjadi tiga, yaitu:

- 1) Fondasi tiang pancang (*Driven Pile*), pemasangannya dilakukan dengan memancang atau menekan tiang berbentuk bulat atau persegi ke dalam tanah.
- 2) Fondasi tiang bor (*Bore Pile*), pengerjaannya dimulai dengan pengeboran tanah hingga kedalaman yang direncanakan, kemudian memasukkan tulangan baja dan mengisinya dengan beton.
- 3) Kaison (*Caisson*), disebut juga sebagai tiang bor dengan diameter yang lebih besar.

b. Fondasi Sumuran (*Pier Foundation*)

Fondasi sumuran adalah jenis fondasi peralihan dari fondasi dangkal ke fondasi tiang. Fondasi ini berbentuk bulat atau persegi dengan diameter yang lebih besar dibandingkan kedalaman fondasi.

2.8 Fondasi Tiang Pancang

Fondasi tiang pancang adalah konstruksi yang terbuat kayu, beton, dan/atau baja yang digunakan untuk meneruskan beban-beban permukaan ke tingkat-tingkat permukaan yang lebih rendah di dalam massa tanah. Hal ini boleh jadi merupakan distribusi vertikal dari beban sepanjang poros tiang pancang atau pemakaian beban secara langsung kepada tingkat yang lebih rendah melalui ujung tiang pancang (Lilies Widodo, 2015).

Keunggulan tiang pancang (*pile foundation*) yaitu:

1. Memberikan daya dukung yang lebih baik dibandingkan fondasi dangkal.
2. Tiang pancang dapat membantu mengurangi penurunan berlebih.
3. Efektif di tanah berair atau lembut, seperti rawa-rawa atau tanah lempung.

4. Mampu menyebarkan beban dari struktur ke area yang lebih luas, mengurangi tekanan pada lapisan tanah di atasnya.
5. Dapat diaplikasikan pada berbagai kondisi tanah dan untuk berbagai jenis bangunan.
6. Proses pemancangan tiang dapat dilakukan relatif cepat, terutama dengan teknologi dan peralatan yang tepat, sehingga menghemat waktu dan biaya konstruksi.

Selain memiliki keunggulan, fondasi tiang pancang juga memiliki kekurangan. Kekurangan tiang pancang (*pile foundation*) yaitu:

1. Pemasangan tiang pancang dapat menyebabkan kebisingan dan getaran yang mengganggu lingkungan sekitar, terutama di daerah perkotaan atau dekat pemukiman.
2. Pada tanah dengan batuan keras atau lapisan tanah yang sangat heterogen, pemasangan tiang pancang bisa menjadi lebih rumit dan memerlukan teknik khusus.
3. Pemasangan tiang pancang bisa menjadi tantangan di lokasi dengan ruang terbatas atau akses yang sulit.
4. Pemasangan tiang pancang memerlukan pengawasan dan pemeriksaan yang cermat untuk memastikan tiang dipasang dengan benar dan mencapai lapisan tanah yang diinginkan.
5. Kepala tiang kadang pecah akibat pemukulan yang tidak baik.

Alat yang digunakan untuk memancang fondasi tiang pancang yaitu:

1. *Drop Hammer*, alat pemancang *drop hammer* merupakan palu raksasa yang diletakkan pada ketinggian tertentu di atas tiang. Palu kemudian dilepaskan dan jatuh mengenai bagian atas/kepala tiang.
2. *Diesel Hammer*, menggunakan sistem piston (pemukul) yang dinaikkan dengan bantuan perangkat mekanik penjatuh kemudian secara otomatis dilepaskan pada ketinggian tertentu.
3. *Hydraulic Hammer*, alat pemukul yang menggunakan tekanan hidraulik untuk memancarkan tiang fondasi. *Hydraulic hammer* menghasilkan dorongan kuat

dengan menggunakan tenaga hidrolik untuk memberikan pemukulan ke tiang fondasi.

4. *Vibratory Hammer*; alat yang memiliki beberapa batang horizontal dengan beban eksentris, berat yang disebabkan oleh beban eksentris menghasilkan getaran dan menekan tiang ke dalam tanah.

2.9 Daya Dukung

Daya dukung adalah kemampuan tanah untuk menahan beban tanpa mengalami keruntuhan atau pengurangan yang berlebihan. Parameter ini penting untuk perencanaan dan pembangunan bangunan, jembatan, dan infrastruktur lainnya. Semakin tinggi nilai daya dukung, maka semakin tinggi kemampuan tanah untuk menahan beban struktural.

Nilai kapasitas dukung ultimit didefinisikan sebagai beban maksimum persatuan luas dimana tanah masih dapat mendukung beban tanpa keruntuhan (Hardiyatmo, 2003). Daya dukung ultimit didapatkan dari jumlah daya dukung terpusat tiang dan tahanan geser pada dinding tiang. Nilai daya dukung tanah dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.9) berikut:

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (2.9)$$

Dimana:

Q_u = Daya dukung ultimit

Q_s = Daya dukung selimut tiang

Q_p = Daya dukung ujung tiang

2.9.1 Daya Dukung Izin

Daya dukung izin (*allowable bearing capacity*) adalah batas maksimum tekanan yang bisa diterima oleh tanah tanpa mengakibatkan keruntuhan atau deformasi berlebihan pada fondasi dan struktur yang ditopangnya. Nilai daya dukung izin diperoleh dengan Persamaan (2.10) berikut:

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FK} \quad (2.10)$$

Dimana:

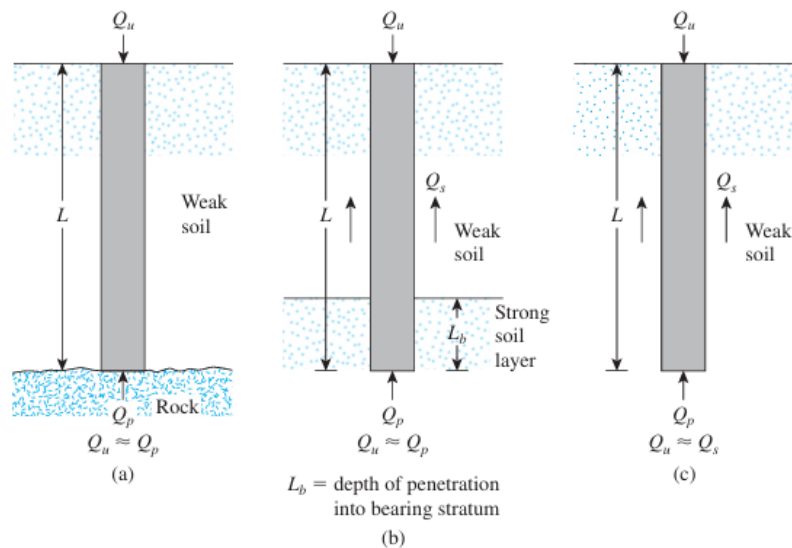
Q_{all} = Daya dukung ijin (kN)

Q_u = Daya dukung ultimit (kN)

FK = Faktor keamanan (minimum 2,5 sesuai SNI 8460:2017) (Badan Standardisasi Nasional, 2017)

2.9.2 Daya Dukung Aksial

Menurut (Das, 2016) fondasi tiang dapat diklasifikasikan menjadi 3 yaitu, daya dukung ujung tiang (*point bearing piles*), daya dukung selimut (*friction piles*).



Gambar 2.6 Daya Dukung Fondasi Tiang

1. Daya Dukung Ujung (*Point Bearing Capacity*)

Daya dukung ujung tiang dengan metode API RP2A (American Petroleum Institute, 1987) dengan Persamaan (2.11) untuk tanah pasir dan Persamaan (2.13) untuk tanah lempung.

$$Q_p = \sigma'_v \times N_q \times A_p \quad (2.11)$$

$$\sigma'_v = \gamma' \left(\frac{h}{2} \right) \quad (2.12)$$

Dimana:

Q_p = Daya dukung ujung tiang (kN)

σ'_v = Tegangan vertikal efektif (kPa)

N_q = Faktor daya dukung

A_p = Luas area ujung tiang (m^2)

$$Q_p = 9 \times C_u \times A_p \quad (2.13)$$

Dimana:

C_u = Kohesi ujung tiang

2. Daya Dukung Selimut (*Frictional Resistance*)

Perhitungan daya dukung selimut tiang dengan metode API RP2A (American Petroleum Institute, 1987) untuk tanah lempung menggunakan Persamaan (2.14) berikut:

$$Q_s = \alpha \times C_u \times A_s \quad (2.14)$$

$$A_s = \pi \times D \times L \quad (2.15)$$

Dimana:

α = Faktor adhesi

C_u = Kohesi (kPa)

A_s = Luas penampang sisi tiang (m^2)

Perhitungan daya dukung selimut tiang dengan metode API RP2A (American Petroleum Institute, 1987) untuk tanah pasir menggunakan Persamaan (2.16) berikut:

$$Q_s = \sigma'_v \times K_o \times \tan(\phi - 5) \times A_s \quad (2.16)$$

Dimana:

σ'_v = Tegangan vertikal efektif (kPa)

K_o = Koefisien tekanan tanah lateral

ϕ = Sudut geser ($^\circ$)

A_s = Luas penampang sisi tiang (m^2)

2.9.3 Daya Dukung Lateral

Daya dukung lateral menggunakan metode p-y yang bertujuan untuk menganalisis tiang di bawah beban lateral menggunakan metode *py curves*. Metode p-y digunakan untuk mengevaluasi defleksi, momen lentur, dan respons tanah terhadap tiang yang mengalami beban lateral. Metode p-y menghitung lendutan, momen lentur, gaya geser, dan respons tanah di sepanjang tiang.

Output utama dari metode p-y meliputi beberapa grafik dan evaluasi teknis. Pertama, grafik *py curve* menunjukkan hubungan antara tekanan tanah dan defleksi tiang, yang menjadi dasar dalam analisis interaksi tanah-struktur. Kedua, distribusi momen lentur menggambarkan perubahan momen sepanjang tiang, sedangkan distribusi gaya geser menampilkan variasi gaya geser yang terjadi di sepanjang elemen tiang.

metode p-y menghasilkan grafik defleksi lateral yang memperlihatkan bentuk lendutan tiang akibat beban lateral. Grafik ini penting untuk menilai batas deformasi dan kestabilan struktur. Selain itu, tersedia grafik beban-penurunan lateral yang menunjukkan respons tiang terhadap berbagai tingkat pembebanan lateral, sehingga memudahkan evaluasi kapasitas dukung lateral tiang.

2.10 Analisis Perilaku Kelompok Tiang

Analisis perilaku kelompok tiang dilakukan untuk mengevaluasi respons fondasi yang mengalami beban kombinasi aksial, lateral, dan torsi pada setiap elemen tiang dengan memperhitungkan interaksi kompleks antara tiang dan tanah. Metode ini memodelkan respons nonlinier tanah dalam bentuk kurva transfer beban, yaitu kurva dan untuk beban aksial, kurva untuk beban lateral, serta kurva untuk beban torsional. Nilai-nilai parameter yang digunakan untuk analisis fondasi yaitu F_z (beban aksial), F_y (beban lateral arah x), F_x (beban lateral arah y), M_x (momen arah x), dan M_y (momen arah y), dan M_z (momen arah z).

Hasil analisis ini memberikan distribusi beban aksial dan lateral secara mendetail pada setiap tiang dalam konfigurasi kelompok, sehingga kontribusi masing-masing tiang terhadap beban total struktur dapat diketahui. Interaksi tanah-tiang divisualisasikan melalui kurva karakteristik yang menggambarkan hubungan nonlinier antara gaya dan deformasi pada berbagai kedalaman.

Selain itu, analisis ini memungkinkan evaluasi daya dukung aksial dan lateral kelompok tiang terhadap gaya eksternal, serta stabilitas struktur pada kondisi tanah spesifik. Kriteria keberhasilan desain dalam analisis ini merujuk pada SNI 8460:2017, yang menetapkan faktor keamanan (SF) minimum sebesar 2,5 dan batas defleksi maksimum sebesar 25 mm. Sebagai batasan struktural, momen retak tiang ditetapkan sebesar 170 kNm, sesuai dengan spesifikasi teknis spun pile yang digunakan.