

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Tanah

Tanah merupakan butiran mineral lempung atau pasir yang memiliki nilai nilai cairan sesuai dengan jenis tanahnya. Dalam proses konstruksi sipil, tanah merupakan unsur penting dalam struktural karena tanah yang baik akan menciptakan struktur bangunan yang baik. Untuk mengetahui tanah baik atau tidaknya maka perencana harus mempelajari sifat dari tanah seperti asal usul tanah, ukuran butiran tanah, kompresibilitas, nilai angka pori, kuat geser tanah, *draine* atau *undrain*, dan daya dukung tanah (Das & Sobhan, 2014).

Tanah berdasarkan sifatnya bisa dibedakan menjadi tanah kohesif dan tanah non kohesif. Tanah pasir merupakan tanah yang tidak kohesif sedangkan tanah lempung bersifat kohesif. Berdasarkan ukuran partikelnya tanah digambarkan menjadi tanah lempung, lanau, lumpur atau pasir. Umumnya, tanah terdiri dari campuran partikel tanah dimana dalam tanah lempung bisa bercampur dengan tanah pasir, lanau maupun tanah organik. Ukuran partikel tanah banyak sekali variasinya mulai dari 0,001 mm sampai 100 mm (Hardiyatmo, 2012).

Menurut Hardiyatmo (2011) dalam ASTM D2487, klasifikasi variasi butiran tanah dapat dibedakan menjadi:

1. *Cobble*, merupakan partikel batuan yang lolos pada saringan 300 mm dengan batuan yang tertahan berada pada daringan 75 mm (berdasarkan standar Amerika dalam saringan lubang bujur sangkar).
2. *Boulder*, merupakan partikel batuan yang tidak lolos pada saringan 300 mm.
3. Kerikil, merupakan partikel batuan yang lolos pada saringan 75 mm dengan batuan yang tertahan berada pada daringan 4,75 mm.
4. Pasir, memiliki beberapa jenis yaitu pasir kasar dengan partikel batuan yang lolos pada saringan 4,75 mm, kemudian pasir sedang dengan batuan yang lolos pada saringan 2 mm, dan pasir halus dengan batuan yang lolos pada saringan 0,425 mm.
5. Lanau, merupakan tanah dengan partikel berbutir halus yang lolos pada saringan 0,075 mm.

6. Lempung, merupakan tanah dengan partikel berbutir halus lebih dari lanau dan bersifat mikroskopis dan berbentuk serpihan atau pelat lempung yang lolos pada saringan 0,075 mm.

Lanau dan lempung merupakan tanah dengan partikel yang hampir sama, cara membedakannya dengan mengambil tanah basah lalu dicetak dan dikeringkan. Kemudian tanah bisa dipecah dan ditekan oleh ibu jari, tanah lanau relatif mudah dilakukan sedangkan untuk tanah lempung membutuhkan usaha yang relatif besar (Peck et al., 1974).

2.2 Penyelidikan Tanah Lapangan

Penyelidikan tanah lapangan merupakan metode dalam penentuan karakteristik tanah, menentukan perlapisan tanah, sifat fisis tanah terkhusus dari kuat geser tanah. Penyelidikan tanah ini diperlukan untuk mendapatkan metode konstruksi yang efisien berdasarkan dari jenis pondasi yang dipilih dan daya dukung tanah (Rahardjo, 2005).

Dalam penyelidikan tanah hasilnya memberikan data atau informasi mengenai kondisi tanah yang diuji dengan informasi yang sesuai dengan keadaan dilapangan untuk mempermudah dalam analisis karakteristik tanah dimana ini mengurangi resiko kegagalan akibat dari bervariasinya jenis tanah pada suatu lokasi yang diuji. Prosedur yang dapat dilakukan untuk tahap penyelidikan tanah sebagai berikut:

1. Evaluasi dan studi kondisi di lapangan. Tahap ini berupa pengamatan topografi, vegetasi, bangunan yang sudah ada, akses jalan, dan lainnya. Selain itu informasi yang harus didapatkan berupa kondisi geologi, kegempaan regional, peraturan setempat, dan besarnya beban dari struktur bangunan.
2. Penyelidikan tanah awal. Tahap ini berupa pemboran dari uji lapangan dalam jumlah yang terbatas. Ini bertujuan untuk merencanakan penyelidikan tanah untuk tahap selanjutnya. Tahap ini juga bertujuan untuk studi kelayakan.
3. Penyelidikan tanah terperinci. Informasi pada tahap ini mencakup perencanaan untuk menentukan jenis, kedalaman, dan daya dukung fondasi untuk mengantisipasi penurunan yang terjadi selama masa konstruksi.

Dalam penyelidikan tanah lapangan terdapat ketentuan untuk syarat jumlah minimum titik penyelidikan yang tanah dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Jumlah Minimum Penyelidikan Tanah

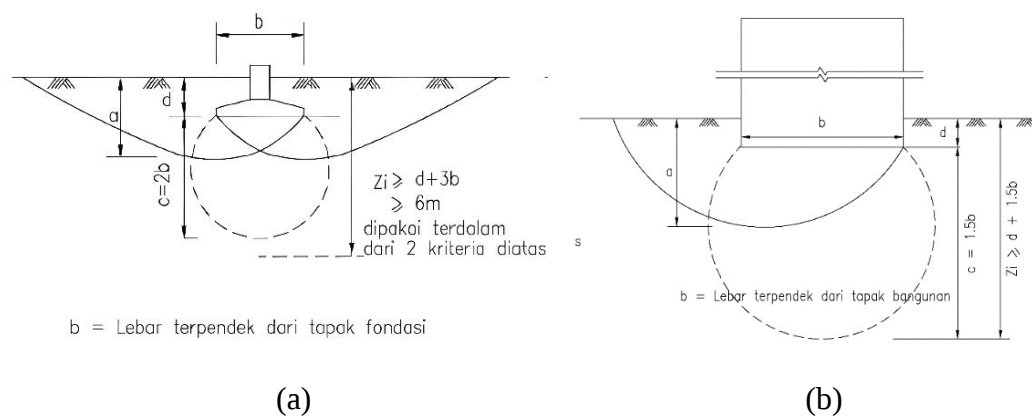
Jenis Struktur	Jumlah Minimum Penyelidikan Tanah
Gedung tinggi ≥ 8 lantai	- Satu titik setiap 300 m² dalam pola grid dengan jarak 20 m sampai 30 m dengan minimum 3 titik per blok menara. - Dalam hal beberapa menara terletak berdekatan, dijadikan satu kesatuan dan digunakan kaidah yang sama. - Tambah titik apabila hasil investigasi menunjukkan anomali lapisan tanah.
Gedung dengan 4 sampai dengan 7 lantai	- Satu titik setiap 400 m² dalam pola grid dengan jarak 15 m sampai 40 m dengan minimum 2 titik per gedung. - Dalam hal beberapa gedung terletak berdekatan, dijadikan satu kesatuan dan digunakan kaidah yang sama. - Tambah titik apabila hasil investigasi menunjukkan anomali lapisan tanah.
Gedung < 4 lantai atau bangunan pabrik (diluar ruang tinggal)	- Satu titik setiap 600 m² dalam pola grid dengan jarak 25 m sampai 50 m dengan minimum 1 titik per gedung. - Dalam hal beberapa gedung terletak berdekatan, dijadikan satu kesatuan dan digunakan kaidah yang sama. - Tambah titik apabila hasil investigasi menunjukkan anomali lapisan tanah.
Bangunan < 4 lantai dengan tapak sangat luas > 2.500 m ²	- Satu titik setiap 2.500 m² dalam pola grid dengan jarak 50 m sampai 100 m. - Tambah titik untuk menghasilkan potongan tanah pada orientasi.

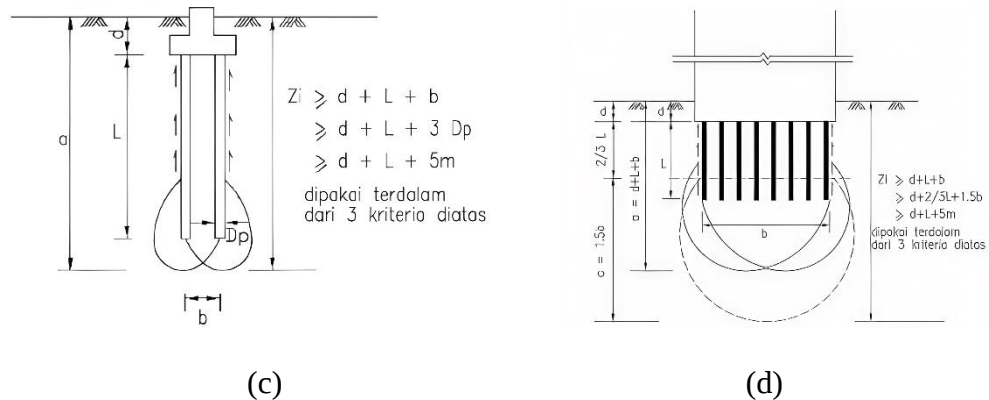
Jenis Struktur	Jumlah Minimum Penyelidikan Tanah
Struktur memanjang (jalan raya, rel kereta, kanal, tanggul, runway dan taxiway)	- Satu titik per 50 sampai 200 m, kecuali runway/taxiway jarak maximum dibatasi 100 m. - Jarak yang besar dapat dipakai pada investigasi awal. - Tambah titik diantaranya apabila hasil investigasi awal menunjukkan adanya variasi tanah yang perlu diinvestigasi lebih detail.
Terowongan transportasi	- Satu titik per 10 sampai 75 m, pada daerah pemukiman dan 20 sampai 200 m pada daerah terbuka. - Jarak yang besar dapat dipakai pada investigasi awal. - Tambah titik diantaranya apabila hasil investigasi awal menunjukkan adanya variasi tanah yang perlu diinvestigasi lebih detail. - Pada setiap portal minimum 1 titik.
Besmen dan/atau dinding penahan tanah - Tinggi < 6 m - Tinggi $\geq$ 6 m	1 titik setiap 15 sampai 40 m 1 titik setiap 10 sampai 30 m
Jembatan	- Untuk jembatan konvensional dengan bentang < 50 m, minimum satu titik pada tiap abutment dan pilar per 2 lajur lalu lintas. - Untuk jembatan khusus dengan bentang $\geq$ 50 m atau jembatan di laut ditentukan oleh tenaga ahli geoteknik.
Konstruksi khusus (menara, fondasi mesin berta, tangki)	1 per 300 m ² tapak konstruksi, dengan minimum 1 titik.

Jenis Struktur	Jumlah Minimum Penyelidikan Tanah
Bendungan besar	- Pada tahap perencanaan awal, minimum 5 titik, pada 3 sumbu bendungan dan 2 titik, masing masing di hulu dan di hilir. - Pada tahap perencanaan detail, penambahan titik bor disesuaikan kondisi geologi yang ditemukan pada penyelidikan tanah perencanaan. Minimum 1 titik setiap 50 m sepanjang sumbu dam. - Tambahkan titik pada pintu air, terowongan pengelak, <i>spillway</i>, <i>outlet</i>, <i>power house</i> dll.
Stabilitas lereng, galian dalam dan timbunan tinggi dengan ketinggian > 6 m untuk tanah	- 3 - 5 titik pada potongan kritis untuk menghasilkan model untuk dilakukan analisis. - Jumlah potongan kritis tergantung tingkat masalah stabilitas. - Untuk longsoran yang masih aktif, minimum satu titik pada sisi atas lereng yang longsor.
Reklamasi	1 per 1.000 m ² luas timbunan,

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2017)

Petunjuk kedalaman penelitian tanah untuk fondasi dapat dilihat berdasarkan Gambar 2.1 dibawah ini.





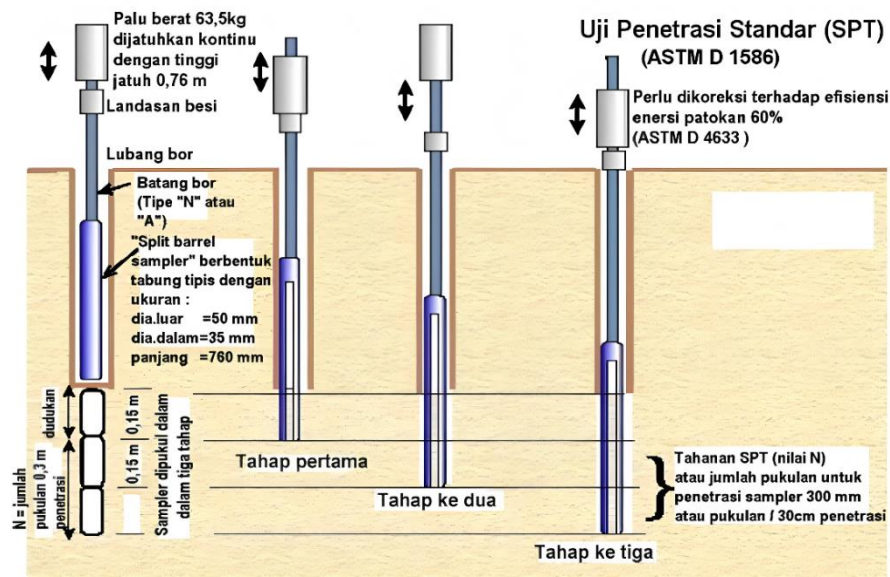
Gambar 2.1 Petunjuk Kedalaman Penyelidikan Tanah: (a) Fondasi; (b) Bangunan;
(c) Fondasi tiang berjauhan; (d) Fondasi bangunan dengan tiang
(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2017)

Penyelidikan tanah perlu dilakukan untuk mendapatkan beberapa hasil sebagai berikut:

1. Mendapatkan hasil dari penyelidikan berupa informasi dari perlapisan tanah dan batuan dimana ini mempermudah untuk mengetahui lapisan dari tanah keras, ketebalan tanah dan kondisi tanah.
2. Mendapatkan informasi Muka Air Tanah (MAT) pada lokasi yang dilakukan penyelidikan.
3. Mendapatkan informasi mengenai sifat fisis tanah dan sifat mekanis tanah atau batuan.
4. Mendapatkan data untuk parameter tanah yang dilakukan analisis.

2.2.1 Standard Penetration Test (SPT)

Standard Penetration Test atau lebih dikenal dengan uji SPT ini biasanya dilakukan karena sampel tanah tak terganggu pada tanah granuler sulit untuk didapatkan. Pada pengujian ini sifat dari tanah pasir dapat ditentukan berdasarkan pengukuran kerapatan relatif dengan secara langsung di lapangan. Uji SPT ini dilakukan untuk mengetahui nilai dari kerapatan relatif, dengan prosedur uji tercantum pada ASTM D1586 dan SNI 4153:2008 pada Gambar 2.2 (Hardiyatmo, 2011).



Gambar 2.2 Skema Urutan Uji Penetrasi Standar (SPT)

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2008)

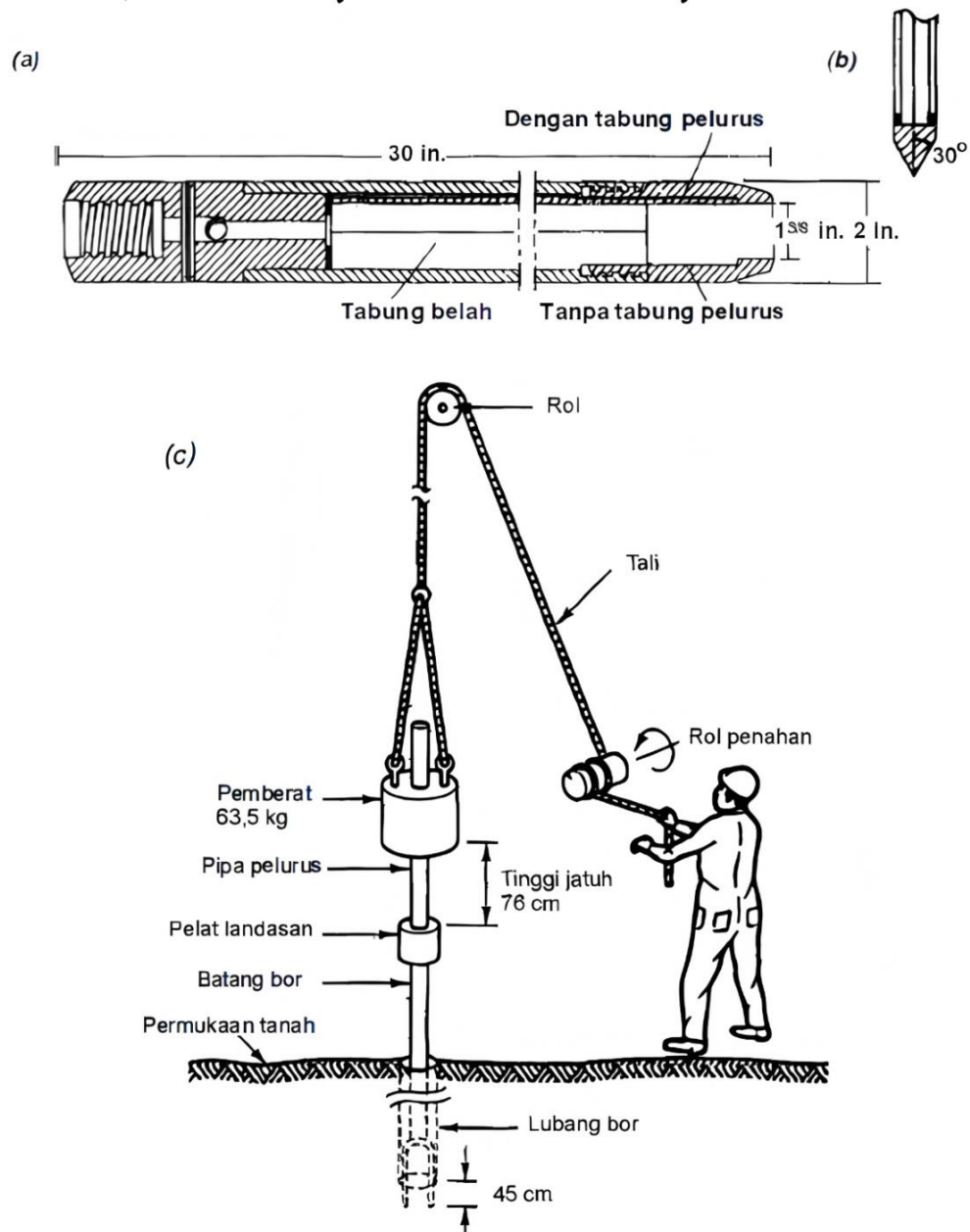
Menurut Bowles (1997) pengujian SPT ini umumnya terdiri dari:

1. Pemancangan alat pengambil contoh bahan silinder belah standar dengan dimensi 460 mm kemudian dimasukkan kedalam tanah di dasar lubang bor.
2. Perhitungan banyaknya pukulan untuk memasukkan tabung dengan jarak 305 mm dan untuk pukulan yang terakhir adalah untuk mendapatkan bilangan N.
3. Dengan menggunakan palu sebagai massa pendorong sebesar 63,5 kg yang dijatuhkan dari ketinggian 760 mm.

Dalam perancangan fondasi, nilai N digunakan sebagai indikasi kemungkinan model keruntuhan fondasi yang akan terjadi (Terzaghi et al., 1996). Kondisi keruntuhan geser lokal (*local shear failure*) dapat terjadi, jika $N < 5$ dan keruntuhan geser umum (*general shear failure*) terjadi pada nilai $N > 30$. Untuk nilai N antara 5 dan 30 dapat diinterpolasi dari koefisien kapasitas daya dukung tanah (Hardiyatmo, 2011).

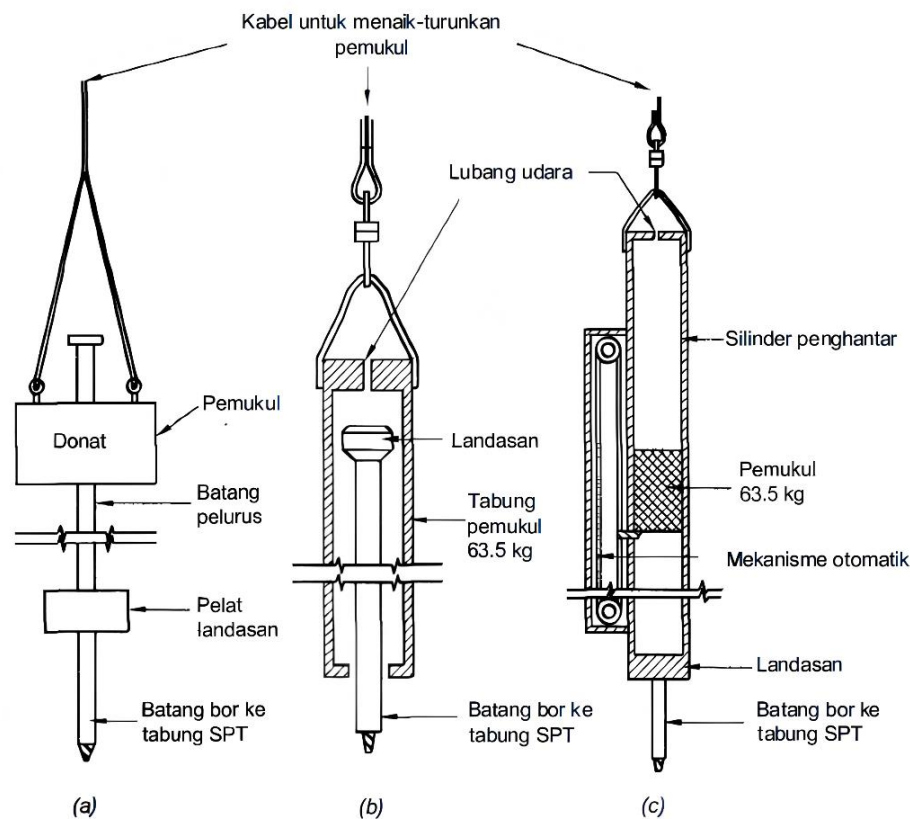
Hasil uji SPT yang dihasilkan sesuai dengan alat yang digunakan dalam pengujian. Untuk mendapatkan data hasil yang baik dapat dilakukan dengan memperhatikan efisiensi energi dari sistem. Pada alat pemukul dalam uji SPT tinggi jatuhnya adalah 48 kg-m (350 ft-lb) dapat dilihat pada Gambar 2.4. Tetapi pada saat

ini alat yang digunakan Gambar 2.3 berupa alat penggerak naik turun pemukul secara otomatis, sehingga data hasil yang didapatkan sesuai dengan aslinya.



Gambar 2.3 Tabung Belah Standar dari Uji SPT: (a) Tabung Standar; (b) Tabung SPT untuk Tanah Berbatu; (c) Uji SPT Cara Manual

(Sumber: Hardiyatmo, 2011)



Gambar 2.4 Tiga tipe Pemukul Uji SPT: (a) Pemukul Donat; (b) Pemukul Aman; (c) Pemukul Otomatis

(Sumber: Hardiyatmo, 2011)

Dalam sebuah pengujian pasti ada keuntungan dan kerugiannya, keuntungan dari uji SPT ini adalah:

1. Mampu memperoleh nilai N dan contoh tanah terganggu.
2. Prosedur pengujian yang sederhana, dapat dilakukan secara manual.
3. Dapat dilakukan pengujian pada semua jenis tanah dari tanah batuan maupun tanah lunak.
4. Pengujian pada tanah pasir mendapatkan hasil secara langsung untuk memperoleh hasil prediksi dari kerapatan relatif dan kapasitas dukung tanah.

Selain keuntungannya terdapat beberapa kerugian juga yang dihasilkan dari pengujian SPT ini, diantaranya yaitu:

1. Sampel tanah yang didapat pada tabung SPT dalam kondisi terganggu.
2. Nilai N pada tanah lempung yang didapatkan merupakan hasil data kasar.
3. Hasil uji SPT tergantung dengan kondisi alat dan operator di tempat uji.

4. Hasil kurang baik untuk kondisi tanah dengan kerikil yang banyak.

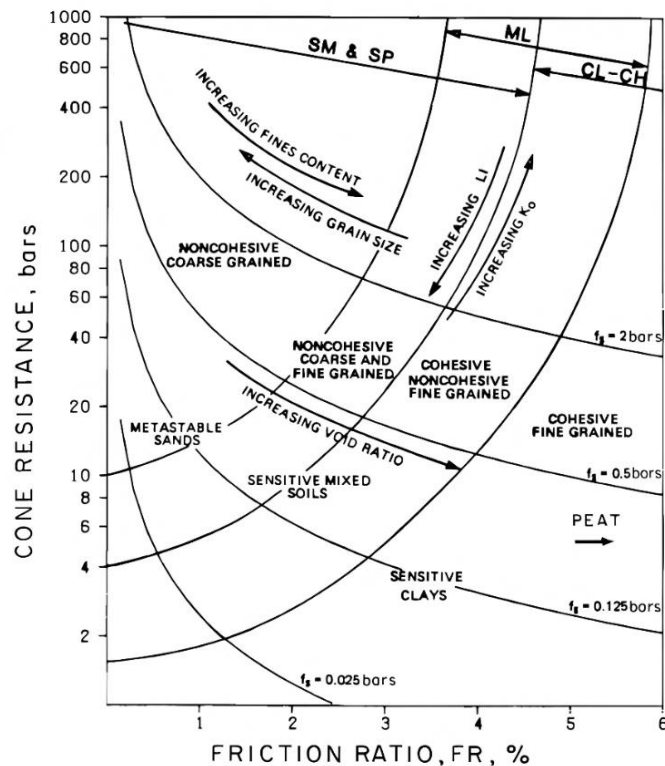
2.2.2 Cone Penetration Test (CPT)

Cone Penetration Test atau lebih dikenal dengan uji CPT merupakan pengujian yang biasa dilakukan pada tanah lempung lunak, pasir halus maupun pasir kasar. Pengujiannya dengan cara mendorong kerucut baku (menurut ASTM D 3441 mempunyai ujung 60° dengan diameter dasar 35,7 mm dengan luas irisan melintang 10 cm^2) kedalam tanah dengan kecepatan 10 sampai 20 mm/detik. Pengujian CPT ini dilakukan dengan pemasangan batang 1 meteran untuk menambahkan kedalaman. Data yang dihasilkan berupa tahanan ujung (q_c) dan tahanan gesek selongsong (q_s) karena banyak data dalam suatu dorongan yang menerus, biasanya dipakai peralatan untuk mengumpulkan data secara elektronik. Ini merupakan cara dengan berbentuk perekam atau sandi digital yang di input ke dalam mikrokomputer. Mikrokomputer ini mempunyai skala kecil yang menguntungkan karena akan diperlukan perekam kartu lajur (Bowles, 1997).

Menurut Hardiyatmo (2011) tahap pengujian CPT dilakukan dengan:

2. Pada posisi awal, konus pada posisi awal sebelum bergerak.
3. Ujung konus ditekan melalui batang penekan kerucut, pada tahapan ini konus mengukur tahanan pada konus (q_c).
4. Pipa bagian luar pengukur lekatan digerakkan untuk menekan konus yang menghasilkan gerakan pipa luar dan konus ke arah bawah. Pada tahapan ini dapat mengukur tahanan konus dan tahanan gesek pipa luar ($q_c + f_s$).
5. Ujung konus dan pipa bagian luar digerakkan dan kembali ke posisi awal.

Pada uji CPT bagian konus tidak mengeluarkan tanah saat pengujian, menyebabkan jenis tanah tidak dapat diketahui dengan pasti. Robert dan Campanella (1983) mengusulkan berupa hubungan tahanan pada konus (q_c) dan rasio gesekan (f_r) untuk mengklasifikasikan tanah secara berdekatan Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Hasil Uji CPT

(Sumber: Hardiyatmo, 2011)

Rasio gesekan (f_r) merupakan perbandingan di antara gesekan selimut lokal, gaya gesek yang bekerja pada selimut konus dibagi dengan luas selimutnya atau gesek satuan (f_s) dengan tahanan konus (q_c).

$$f_r = \frac{f_s}{q_c} \times 100\% \quad (2.1)$$

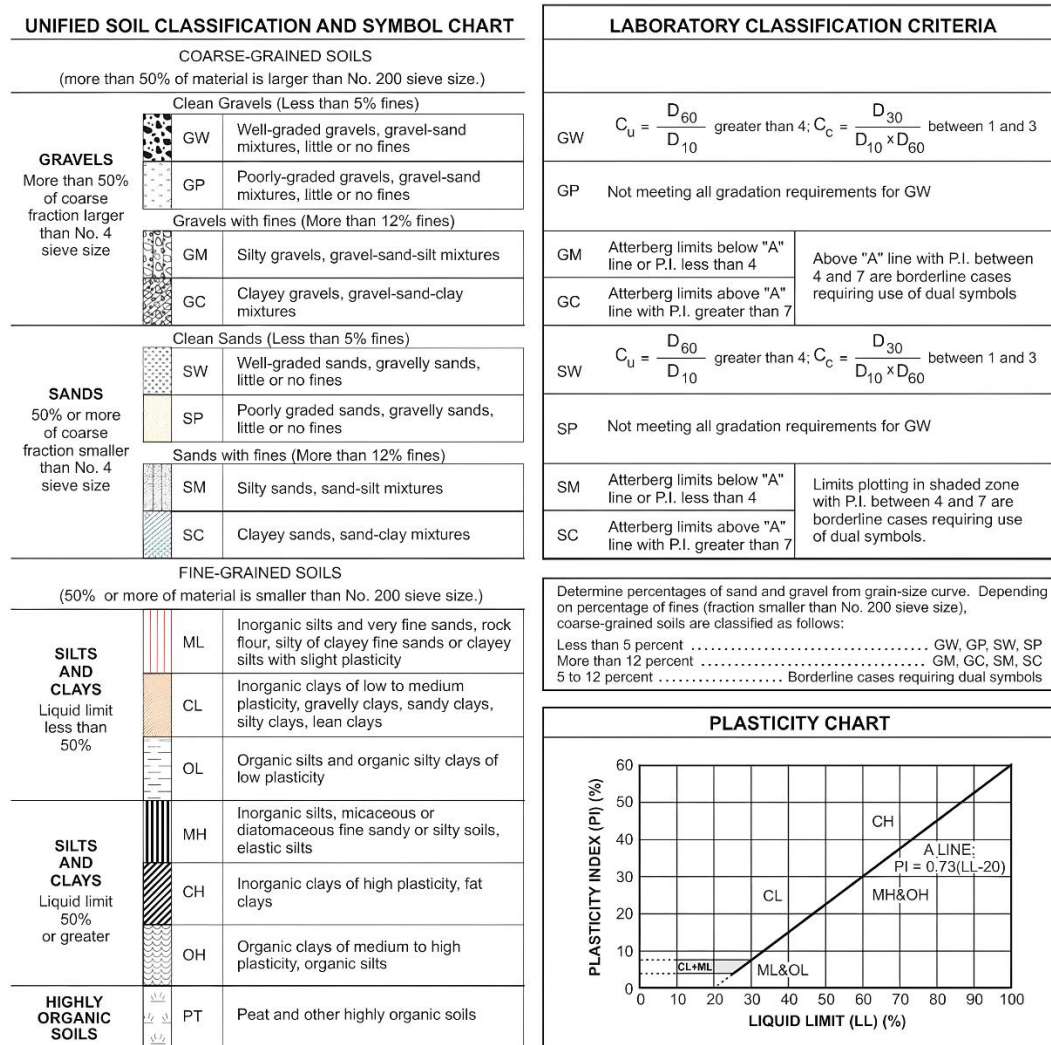
2.3 Interpretasi Hasil Uji

Interpretasi hasil uji tanah merupakan salah satu cara untuk menganalisis data yang diperoleh berdasarkan pengujian di lapangan maupun di laboratorium. Tujuan utamanya interpretasi uji tanah yaitu untuk mengetahui sifat dan karakteristik tanah.

2.3.1 Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah merupakan bentuk pengelompokan tanah berdasarkan dari sifat fisik dan sifat mekanik dari tanah. Tujuan utama dari klasifikasi tanah adalah untuk memahami karakteristik dari tanah. Klasifikasi tanah ini berdasarkan ukuran

butiran tanah, plastisitas, bentuk butiran tanah, dan sifat tanah lainnya. Dengan klasifikasi umum yang sering digunakan yaitu USCS (Unified Soil Classification System) pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Sistem Klasifikasi USCS

(Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga, 2019)

2.3.2 Stratifikasi Tanah

Stratifikasi tanah merupakan penggambaran jenis lapisan lapisan tanah yang berada di bawah permukaan berdasarkan dari hasil pengujian yang telah dilakukan. Stratifikasi tanah berisi informasi mengenai ketebalan kedalaman tanah dan jenis dari lapisan tanah. Hubungan N-SPT dengan tanah lempung dan tanah pasir dapat dilihat pada Tabel 2.2 dan Tabel 2.3.

Tabel 2.2 Hubungan N-SPT dengan Konsistensi Tanah Lempung

Consistency	N-SPT
<i>Very Soft</i>	0 – 2
<i>Soft</i>	2 – 4
<i>Medium</i>	4 – 8
<i>Stiff</i>	8 – 15
<i>Very Stiff</i>	15 – 30
<i>Hard</i>	>30

(Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga, 2019)

Tabel 2.3 Hubungan N-SPT dengan Penentuan Kepadatan Relatif Tanah Pasir

Relatif Density	N-SPT
<i>Very Loose</i>	0 – 4
<i>Loose</i>	4 – 10
<i>Medium</i>	10 – 30
<i>Dense</i>	30 – 50
<i>Very Dense</i>	>50

(Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga, 2019)

2.3.3 Parameter Tanah

Parameter tanah digunakan untuk mengidentifikasi berbagai parameter yang dimiliki oleh karakteristik tanah. Parameter tanah ini dimanfaatkan untuk membantu perhitungan pada tanah untuk mengklasifikasikan data tanah, baik data berupa sifat fisik maupun sifat kimia tanah.

2.3.3.1 Berat Isi Tanah

Berat isi tanah atau berat volume tanah merupakan sifat fisika tanah yang telah ditetapkan. Berat isi tanah dibedakan menjadi dua parameter yang pertama berat isi tanah normal (γ_n), dan berat isi tanah tersaturasi (γ_{sat}). Berat isi tanah tersaturasi merupakan berat volume (*unit weight*) tanah jenuh, dimana γ' merupakan berat volume (*unit weight*) tanah efektif atau berat volume tanah yang

terendam. Berat volume efektif dapat diselesaikan menggunakan persamaan (2.2) dibawah ini.

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

Dimana, $\gamma_w = 1 \text{ t/m}^3$ atau $9,81 \text{ kN/m}^3$.

Perhitungan parameter tanah untuk berat isi tanah normal dan berat isi tanah tersaturasi dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Berat Isi Tanah Normal dan Tanah Tersaturasi

		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>	21,0		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	

(Sumber: Ameratunga et al., 2016)

2.3.3.2 Angka Pori (Void Ratio)

Angka pori (e_0) merupakan rasio tanah yang tidak diisi oleh partikel padat (*volume void*) dengan volume partikel padat dalam suatu massa tanah. Angka pori menunjukkan area kosong atau pori tanah yang tidak terisi tanah. Pori tanah kosong yang terisi air atau butiran tanah yang lebih kecil ini dapat mengubah sifat dari tanah, angka pori tanah berdasarkan jenis tanahnya dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Angka Pori berdasarkan Jenis Tanah

<i>Type of Soil</i>	<i>Void Ratio</i>	<i>Natural Moisture Content in a Saturated State (%)</i>	<i>Dry Unit Weight, γ_d (kN/m³)</i>
<i>Loose uniform sand</i>	0,8	30	14,5
<i>Dense uniform sand</i>	0,45	16	18
<i>Loose angular-grained silty sand</i>	0,65	25	16
<i>Dense angular-grained silty sand</i>	0,4	15	19
<i>Stiff clay</i>	0,6	21	17
<i>Soft clay</i>	0,9 – 1,4	30 – 50	11,5 – 14,5
<i>Loess</i>	0,9	25	13,5
<i>Soft organic clay</i>	1,5 – 3,2	90 – 120	6 – 8
<i>Glacial till</i>	0,3	20	21

(Sumber: Das & Sobhan, 2014)

2.3.3.3 Modulus Elastisitas Tanah

Modulus elastisitas tanah (E) merupakan koefisien tanah yang menghubungkan antara besar tegangan dan regangan yang terjadi pada tanah, nilai parameter elastisitas tanah ini sulit untuk diperkirakan karena banyaknya faktor yang harus diperhatikan, parameter elastisitas tanah dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Parameter Elastisitas Beberapa Jenis Tanah

<i>Type</i>	<i>Strength of Soil</i>	<i>Elastic Modulus, E (MPa)</i>	
		<i>Short term</i>	<i>Long term</i>
<i>Gravel</i>	<i>Loose</i>	25 – 50	
	<i>Medium</i>	50 – 100	
	<i>Dense</i>	100 – 200	
<i>Medium to coarse sand</i>	<i>Very loose</i>	<5	
	<i>Loose</i>	3 – 10	
	<i>Medium dense</i>	8 – 30	
	<i>Dense</i>	25 – 50	
	<i>Very dense</i>	40 – 100	
<i>Fine sand</i>	<i>Loose</i>	2 – 5	
	<i>Medium</i>	10 – 25	
	<i>Dense</i>	25 – 50	
<i>Silt</i>	<i>Soft</i>	<10	<8
	<i>Stiff</i>	10 – 20	8 – 15
	<i>Hard</i>	>20	>15
<i>Clay</i>	<i>Very soft</i>	<3	<2
	<i>Soft</i>	2 – 7	1 – 5
	<i>Firm</i>	5 – 12	4 – 8
	<i>Stiff</i>	10 – 25	7 – 20
	<i>Very Stiff</i>	20 – 50	15 – 35
	<i>Hard</i>	40 – 80	35 – 60

(Sumber: Look, 2007)

2.3.3.4 Undrained Shear Strength

Undrained Shear Strength (C_u) merupakan sebuah parameter kuat geser tanah yaitu kohesi tanah pada kondisi *undrained*, ini menunjukkan kemampuan tanah untuk menahan geseran tanpa mengalami perubahan volume akibat kurangnya waktu yang cukup untuk mengalirkan air pori tanah. Dalam menentukan nilai C_u dapat ditentukan dengan hasil uji laboratorium maupun korelasi yang dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Nilai *Undrained Cohesion* pada Tanah Lempung

Consistency	N	C_u(kN/m²)
<i>Very soft</i>	0 – 2	<12
<i>Soft</i>	2 – 4	12 – 25
<i>Medium</i>	4 – 8	25 – 50
<i>Stiff</i>	8 – 15	50 – 100
<i>Very Stiff</i>	15 – 30	100 – 200
<i>Hard</i>	>30	>200

(Sumber: Ameratunga et al., 2016)

2.3.3.5 Sudut Geser Tanah

Sudut geser tanah merupakan kemampuan tanah untuk menahan geseran yang terjadi. Besar nilai kohesi dalam batuan dipengaruhi oleh kekuatan geser yang semakin besar. Dalam menentukan sudut dapat ditentukan dengan hasil uji laboratorium maupun korelasi yang dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2.8 Nilai Sudut Geser pada Tanah Non Kohesif

Consistency	N-SPT	Friction Angle
<i>Very Loose</i>	0 – 4	<30
<i>Loose</i>	4 – 10	30 – 35
<i>Medium</i>	10 – 30	35 – 40
<i>Dense</i>	30 – 50	40 – 45
<i>Very Dense</i>	>50	>45

(Sumber: Look, 2007)

2.3.3.6 Kohesi Efektif dan Sudut Geser Efektif

Pada tanah lempung terkonsolidasi normal, nilai sudut geser efektif (ϕ') dapat bernilai < 20° sampai <30°. Sedangkan pada tanah lempung keras nilai sudut geser efektif berada pada interval 25° - 30° bahkan bisa lebih tinggi dari rentang. Korelasi untuk parameter kohesi efektif dan sudut geser dapat dilihat pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Nilai c' dan ϕ'

Soil Grup	Typical Soil Group	Soil Parameters	
		c' (kPa)	ϕ' (degree)
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 sand clays; gravelly clays; compact clayey sand and sandy silt; compacted clay fills	0 – 10	25 – 32
Good	Gravelly sand, compacted, controlled crushed sandstone and graveled fills, dense well graded sands	0 - 5	32 - 37
Very good	Weak weathered rock, controlled fills or road base, gravel and recycled concrete	0 – 25	36 – 43

(Sumber: Ameratunga et al., 2016)

2.3.3.7 Nilai Kekakuan

Nilai kekakuan (k) menurut Wang & Reese (1993) merupakan nilai kekakuan yang terjadi pada tanah lateral atau bisa juga disebut dengan reaksi modulus pada tanah lateral yang disesuaikan dengan jenis tanahnya. Untuk nilai k pada tanah lempung pada Tabel 2.10 sedangkan untuk nilai k tanah pasir dapat dilihat pada Tabel 2.11.

Tabel 2.10 Representatif Nilai k untuk Tanah Lempung

Soil Modulus Parameter k for Clay		
Average Undrained Shear	Static	Cyclic
<i>Soft Clay</i>	8.140 kPa/m	-
<i>Medium Clay</i>	27.150 kPa/m	-
<i>Stiff Clay</i>	136.000 kPa/m	54.300 kPa/m
<i>Very Stiff Clay</i>	271.000 kPa/m	198.500 kPa/m
<i>Hard Clay</i>	543.000 kPa/m	271.000 kPa/m

(Sumber: Wang & Reese, 1993)

Tabel 2.11 Representatif Nilai k untuk Tanah Pasir

Soil Modulus Parameter k for Sand			
Relative	Loose	Medium	Dense
<i>Submerged Sand</i>	5.430 kPa/m	16.300 kPa/m	33.900 kPa/m
<i>Sand Above Water Table</i>	6.790 kPa/m	24.430 kPa/m	61.000 kPa/m

(Sumber: Wang & Reese, 1993)

2.3.3.8 Nilai ϵ_{50}

Nilai ϵ_{50} menurut Wang & Reese (1993) merupakan nilai regangan yang terjadi pada tanah dengan nilai regangan yaitu 50% dari nilai tegangan maksimumnya. Nilai ini juga memberitahukan perilaku nonlinear tanah dalam menganalisis nilai yang terjadi pada beban lateral. Nilai ϵ_{50} dilihat pada Tabel 2.12.

Tabel 2.12 Nilai ϵ_{50} pada Tanah Lempung

Soil Strain Parameter ϵ_{50}	
<i>Soft Clay</i>	$\epsilon_{50} = 0,02$
<i>Medium Clay</i>	$\epsilon_{50} = 0,01$
<i>Stiff Clay</i>	$\epsilon_{50} = 0,007$
<i>Very Stiff Clay</i>	$\epsilon_{50} = 0,005$
<i>Hard Clay</i>	$\epsilon_{50} = 0,004$

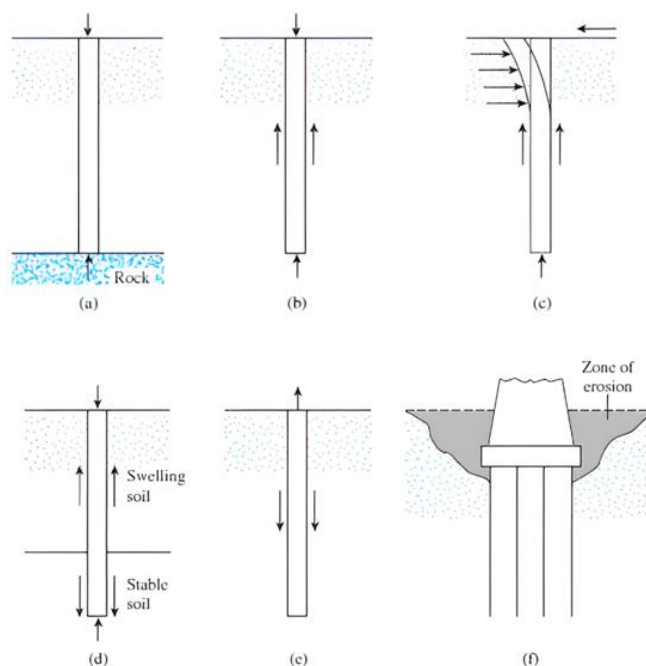
(Sumber: Wang & Reese, 1993)

2.4 Fondasi Dalam

Fondasi merupakan bagian sistem perencanaan bangunan dimana beban yang diteruskan oleh struktur akan ditopang oleh bagian bawah strukturnya yaitu bagian fondasi, beban yang ditopang oleh fondasi adalah beban struktur yang di transfer ke tanah disekitar fondasi (Bowles, 1997).

2.4.1 Tiang Pancang

Fondasi tiang pancang bertujuan untuk mentransfer beban sampai ke lapisan tanah paling keras dengan daya dukung yang baik, yang mampu menahan beban di atasnya maupun beban angkat akibat tinggi muka air tanah dan gaya gempa. Fondasi tiang pancang ini memiliki beberapa kelebihan dimana kualitas bahan yang digunakan kualitasnya dapat terkontrol serta pelaksanaan yang dengan cepat. Selain kelebihan dari tiang pancang, terdapat kelemahan pada penggunaan tiang pancang ini dimana saat proses pemancangan dapat menimbulkan getaran yang dapat mengganggu area di sekitar. Untuk mengatasi gangguan getaran, pemancangan ini dapat dilakukan dengan pemancangan hidrolik atau *vibration hammer* (Rahardjo, 2005). Kondisi penggunaan tiang pancang menurut Vesic 1977 dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Kondisi Penggunaan Tiang Pancang

(Sumber: Das, 2011)

Berdasarkan dari Gambar 2.7 dapat diketahui enam jenis kondisi penggunaan tiang pancang yaitu:

- (a) Satu lapisan tanah atau lebih tidak mendukung untuk penahanan beban atau terlalu lemah tiang akan digunakan untuk mentransfer beban ke lapisan batuan dasar yang lebih kuat.
- (b) Lapisan batuan tidak ditemukan pada kedalaman yang wajar, tiang akan digunakan untuk mentransfer beban dari struktur ke dalam tanah secara bertahap. Tahanan terhadap beban struktur ini berasal dari ketahanan gesekan yang berkembang di antarmuka tiang dan tanah.
- (c) Fondasi yang terkena gaya horizontal maka tiang akan membengkok dengan tetap mendukung beban vertikal yang di transfer oleh struktur. Situasi ini sering terjadi pada desain fondasi bangunan tinggi yang terkena angin atau gaya gempa.
- (d) Pengembangan tanah yang terjadi akan menyebabkan kerusakan pada struktur bangunan. Kondisi fondasi tiang ini dapat menjadi alternatif ketika tiang diperpanjang melampaui zona aktif yaitu pembengkakan dan penyusutan. Tiang dapat digunakan dengan menanam ke lapisan tanah paling stabil diluar zona kelembapan akan berubah.
- (e) Pondasi beberapa struktur seperti menara transmisi, platform lepas pantai, dan pelat *basement* di bawah permukaan air tanah, terkena gaya angkat. Pancang kadang-kadang digunakan untuk pondasi ini untuk menahan gaya angkat.
- (f) Penyangga jembatan dan tiang biasanya dibangun di atas pondasi pancang untuk menghindari kehilangan kapasitas dukung yang mungkin dialami oleh pondasi dangkal karena erosi tanah di permukaan tanah.

2.4.1.1 Tiang Pancang Kayu

Penggunaan tiang pancang kayu ini material kayu yang digunakan haruslah kayu dengan batang yang lurus dan kayu yang baik. Panjang kayu maksimal dalam penggunaannya yaitu 1 – 12 m dengan diameter tipikal 10 - 30 cm mampu menahan beban tipikal 1 – 20 ton. Dalam penggunaannya terdapat beberapa kekurangan seperti sulit untuk dilakukan penyambungan dan mudah rusak jadi menyebabkan perlu ada penanganan khusus, dengan kelebihanannya pelaksanaannya lebih mudah

dan dari segi biaya lebih murah. Material tiang pancang ini dapat disesuaikan dengan kebutuhan konstruksi yang akan dilakukan.

2.4.1.2 Tiang Pancang Baja

Tiang pancang baja dalam proses pemancangannya dapat dilakukan dengan kondisi ujung terbuka dan tertutup. Dalam proses pemancangannya tiang dengan material baja ini diisi dengan material beton setelah material dilakukan pemancangan. Panjang tipikal dari tiang pancang dengan material baja ini umumnya 5 – 60 m dengan beban tipikalnya 100 – 20.000 kN. Kelebihan penggunaan tiang pancang baja ini jika melakukan penyambungan lebih mudah, selain itu tiang pancang baja ini memiliki kapasitas beban yang tinggi dan mampu menembus tanah dengan lapisan yang keras saat pemancangan. Selain kelebihanannya, tiang pancang baja ini memiliki kekurangan dimana tiang mudah terjadi korosi dan tingkat kebisingan yang sangat tinggi saat proses pemancangan.

2.4.1.3 Tiang Pancang Beton

Tiang pancang beton ini memiliki 2 jenis tiang pancang yaitu *prestress* dan *precast* tulangan ulir. Penggunaan panjang tipikalnya untuk jenis prestressed antara 6 – 24 m, kemudian untuk jenis precast tulangan ulir yaitu 3 – 9 m. Diameter tipikal tiangnya antara 300 – 2.500 mm. Tiang pancang jenis prestressed mampu menahan beban tipikal 700 – 8000 kN dan beban tipikal 300 – 1000 kN untuk tiang pancang jenis precast tulangan ulir. Kelebihan dari penggunaan tiang pancang beton ini tiang tidak mudah korosif ditambah kapasitas dari tiang juga sangat tinggi, tetapi penggunaan tiang pancang beton ini rumit dalam pengangkatan dan penyambungan. Pada Gambar 2.8 merupakan spesifikasi tiang pancang beton produksi Wijaya Karya Beton tbk.

[3] Concrete Compressive Strength : PC Spun Pile : $f_c' = 52 \text{ MPa}$
 PHC Spun Pile : $f_c' = 80 \text{ MPa}$

Size	Thickness Wall	Cross Section	Unit Weight	SNI 9156 : 2023				JIS A 5335 : 1987			Allowable Compression			Length of Pile ⁽²⁾
				Class	Effective Prestress	Bending Moment Crack	Nominal	Class	Bending Moment Crack	Break	PC-52	PHC-80	Decomp. Tension	
(mm)	(mm)	(cm²)	(kg/m)		(MPa)	(kN.m)	(kN.m)		(kN.m)	(kN.m)	(kN)	(kN)	(kN)	(m)
300	60	452	113	A1	4,89	24,5	39,9	A2	24,5	36,8	717	1120	221	6 - 13
				A2	6,37	26,9	50,6	-	-	-	698	1100	288	6 - 13
				A3	7,75	29,4	60,4	A3	29,4	44,1	681	1090	351	6 - 13
				B	9,06	34,3	69,3	B	34,3	61,8	665	1070	410	6 - 15
				C	11,45	39,2	83,8	C	39,2	78,4	636	1040	518	6 - 15
350	65	582	145	A1	3,87	34,3	48,8	A1	34,3	51,5	937	1460	225	6 - 13
				A2	5,06	39,2	62,2	-	-	-	919	1440	294	6 - 13
				A3	7,3	44,1	86,8	A3	41,2	61,8	884	1410	425	6 - 13
				B	8,34	49,0	97,8	B	49,0	88,3	867	1390	485	6 - 16
				C	10,84	58,9	121,7	C	58,8	117,7	828	1340	631	6 - 16
400	75	766	191	A1	3,92	44,1	73,8	-	-	-	1233	1930	300	6 - 13
				A2	4,82	54,0	89,4	A2	53,9	80,9	1214	1910	369	6 - 13
				A3	6,56	63,8	118,2	A3	63,7	95,6	1178	1870	502	6 - 13
				B	8,95	73,6	155,7	B	73,5	132,4	1128	1810	685	6 - 17
				C	10,96	88,3	183,8	C	88,3	176,5	1087	1770	839	6 - 17
450	80	930	232	A1	4,02	73,6	110,9	A1	73,5	110,3	1494	2340	374	6 - 15
				A2	5,5	83,4	139,1	A2	83,4	125,0	1457	2300	511	6 - 15
				A3	7,58	98,1	186,3	A3	98,1	147,1	1405	2240	705	6 - 15
				B	8,87	107,9	214,1	B	107,9	194,2	1373	2210	825	6 - 18
				C	11,22	122,6	260,0	C	122,6	245,2	1314	2140	1043	6 - 18
500	90	1.159	290	A1	4,49	103,0	159,9	A1	103,0	154,4	1848	2900	521	6 - 16
				A2	6,23	122,6	216,2	A2	122,6	183,9	1794	2840	722	6 - 16
				A3	7,33	137,3	250,9	A3	137,3	205,9	1759	2800	850	6 - 16
				B	8,38	147,2	283,0	B	147,1	264,8	1726	2770	971	6 - 19
				C	10,89	166,8	353,5	C	166,7	333,4	1648	2680	1262	6 - 19
600	100	1.571	393	A1	4,28	166,8	251,4	A1	166,7	250,1	2514	3940	672	6 - 17
				A2	5,15	186,4	298,2	A2	186,3	279,5	2476	3900	809	6 - 17
				A3	7,23	215,8	409,7	A3	215,7	323,6	2388	3810	1136	6 - 17
				B	8,47	245,2	473,2	B	245,2	441,3	2336	3750	1330	6 - 21
				C	10,76	284,5	581,4	C	284,4	568,8	2239	3640	1690	6 - 21
800	120	2.564	641	A1	4,64	392,4	594,7	A1	392,2	588,4	4078	6410	1189	6 - 20
				A2	5,9	451,3	745,3	A2	451,1	676,6	3990	6320	1512	6 - 20
				A3	7,11	500,3	886,4	A3	500,1	750,2	3906	6220	1823	6 - 20
				B	8,52	539,6	1044,0	B	539,3	970,8	3809	6120	2184	6 - 24
				C	11,17	637,6	1311,0	C	637,4	1274,8	3625	5920	2863	6 - 24
1000 ⁽¹⁾	140	3.782	946	A1	4,71	735,8	1123,0	A1	735,5	1103,2	6009	9450	1782	6 - 23
				A2	5,58	804,4	1316,0	A2	804,1	1206,1	5921	9360	2111	6 - 23
				A3	6,82	912,3	1591,0	A3	912,0	1367,9	5794	9220	2580	6 - 23
				B	8,3	1030,0	1904,0	B	1029,6	1853,3	5643	9050	3139	6 - 24
				C	10,46	1177,0	2372,0	C	1176,7	2353,4	5422	8810	3956	6 - 24
1200 ⁽¹⁾	150	4.948	1.237	A1	4,8	1177,0	1816,0	A1	1176,7	1765,1	7850	12360	2375	6 - 24
				A2	6,11	1275,0	2284,0	A2	1274,8	1912,2	7675	12160	3023	6 - 24
				A3	7,14	1422,0	2640,0	A3	1421,9	2132,8	7538	12010	3533	6 - 24
				B	9,47	1668,0	3504,0	B	1667,0	3000,6	7226	11670	4686	6 - 24
				C	10,85	1962,0	3939,0	C	1961,2	3922,4	7041	11470	5369	6 - 24

Gambar 2.8 Spesifikasi *Spun Piles*

600	100	1.571	393	A1	4,28	166,8	251,4	A1	166,7	250,1	2514	3940	672	6 - 17
				A2	5,15	186,4	298,2	A2	186,3	279,5	2476	3900	809	6 - 17
				A3	7,23	215,8	409,7	A3	215,7	323,6	2388	3810	1136	6 - 17
				B	8,47	245,2	473,2	B	245,2	441,3	2336	3750	1330	6 - 21
				C	10,76	284,5	581,4	C	284,4	568,8	2239	3640	1690	6 - 21

Gambar 2.9 Spesifikasi *Spun Pile* yang digunakan untuk Penelitian

2.4.2 Metode Konstruksi

Tiang pancang merupakan material yang digunakan untuk fondasi bangunan yang digunakan untuk menahan beban yang nantinya disalurkan ke lapisan tanah yang paling keras. Dalam metode konstruksi tiang pancang terdapat beberapa tahapan yang dapat dilakukan.

2.4.2.1 Penentuan Lokasi Tiang Pancang

Penentuan lokasi untuk pemancangan merupakan tahapan penting yang harus dilakukan sebelum pemancangan. Ini dilakukan untuk memastikan kekuatan dari struktur yang dilakukan pembangunan.

2.4.2.2 Pemeriksaan Kondisi Tiang Pancang

Kondisi tiang pancang yang digunakan haruslah sesuai dengan kebutuhan yang telah direncanakan oleh ahli geoteknik. Umumnya pemeriksaan tiang pancang yang sering dilakukan berupa pemeriksaan dimensi tiang, umur dari tiang, kondisi fisik tiang (terjadi retakan).

2.4.2.3 Pengangkatan dan Pengecekan Kelurusan Tiang

Pada tahap ini bertujuan untuk memastikan bahwa tiang dipasang dengan benar dan sesuai dengan perencanaan yang diharapkan mampu untuk menahan beban yang telah direncanakan. Tahapan yang dilakukan yaitu:

1. Pengikatan sling pada *marking* tiang, kemudian *drive cap* dan *cushion* dipasang sesuai dengan ukuran tiang. Dengan dapat dipastikan umur tiang beton yang digunakan harus lebih dari 14 hari ($80\% f_c'$).
2. Pastikan bahwa area kerja telah steril dan tiang yang diangkat untuk dilakukan pemancangan.
3. Selanjutnya pastikan bahwa tiang dan *leader* harus berada di posisi yang sejajar. Pada tahap ini dapat menggunakan waterpass untuk pemantauan.
4. Sumbu tiang yang dilakukan pemancangan harus dipastikan sejajar pada garis yang sejajar dengan hammer.

2.4.2.4 Penyambungan Tiang

Penyambungan tiang ini dilakukan untuk memperpanjang tiang disaat tiang yang tersedia tidak mencapai tiang yang diinginkan. Beberapa hal yang dilakukan pada metode konstruksi penyambungan tiang:

1. Pengelasan yang dilakukan pada saat penyambungan tiang dapat dilakukan dengan welder yang berkualifikasi. Pengelasan dilakukan secara penuh pada alur pelat tiang pancang.

2. Pada saat pengelasan dilakukan, wajib menggunakan keselamatan kerja selama proses pengelasan.
3. Setelah pengelasan selesai bersihkan kerak hasil pengelasan sebelum lapisan selanjutnya. Proses pemancangan dapat dilakukan disaat sambungan las telah berada pada suhu alami 200 - 250° C dan pelat sambung di *counting*.

2.4.2.5 Pengukuran Nilai Set

Nilai penetrasi tiang didapat pada 10 pukulan terakhir, dimana nilai ini dapat dicatat pada kertas milimeter blok yang ditempelkan pada tiang pancang. Nilai yang dicatat berupa nilai set (s) dan nilai rebound (r). Dalam memperkirakan daya dukungnya dapat menggunakan dengan formula dinamik.

2.4.2.6 Pemotongan Tiang

Pemotongan tiang merupakan tahap akhir dari proses pemancangan tiang. Pada proses pemotongan tiang pancang ini harus dilakukan dengan hati hati untuk mencegah kerusakan pada tiang yang telah dilakukan pemancangan. Proses yang dapat dilakukan pada proses pemotongan tiang yaitu sebagai berikut:

1. Pemasangan sling ikat di bagian atas tiang dipotong pada level pemotongan dengan alat tiang (*electric pile cutter*).
2. Bagian tiang yang telah dipotong dapat diangkat kemudian dipindahkan dengan menggunakan bantuan alat crane.
3. Bagian luar dari tiang dapat dipotong melingkar dengan menggunakan *pile cutter*, bagian mata gerindra dari cutter harus dipastikan tidak lebih dari selimut beton.

2.5 Daya Dukung Lateral Tiang Pancang

Daya dukung lateral merupakan kemampuan tanah untuk mendukung fondasi untuk menahan beban horizontal yang diterima fondasi. Beban horizontal berupa beban yang berasal dari gempa bumi, ledakan bom, operasi mesin dan konstruksi, pertambangan, lalu lintas, angin, aksi gelombang dan beban lainnya (Handiman et al., 2023).

Menurut Hardiyatmo (2008) perancangan fondasi tiang yang menahan beban lateral harus memperhatikan dua kriteria, yaitu:

1. Faktor aman terhadap keruntuhan ultimit harus memenuhi syarat.
2. Defleksi yang terjadi akibat beban yang bekerja harus masih dalam batas toleransi.

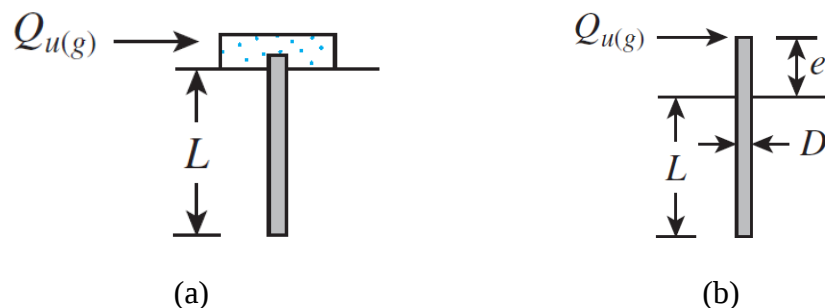
Menurut Prakash & Sharma (1990) daya dukung lateral pada tiang dapat diperhitungkan dengan mempertimbangkan 2 kriteria berupa:

1. Daya dukung izin lateral tiang didapatkan dari hasil daya dukung ultimate dibagi dengan nilai faktor keamanan.
2. Daya dukung lateral tiang dapat berdasarkan dari nilai defleksi lateral yang diizinkan.

Defleksi yang terjadi pada fondasi tiang pancang tidak diperbolehkan memiliki defleksi yang besar, berdasarkan Badan Standardisasi Nasional (2017) defleksi lateral yang diizinkan pada tiang yaitu sebesar 12 mm untuk gempa rencana dan 25 mm untuk gempa kuat dengan kondisi tiang tunggal dan *free head*.

2.5.1 Metode Broms

Berdasarkan metode Broms (1964), daya dukung lateral dibedakan berdasarkan kondisi tiang, yaitu kondisi tiang *free head* dan tiang *fixed head* Gambar 2.10 untuk pasir dengan variasi tanah lempung dan tanah pasir. Tiang panjang yaitu tiang dengan $L \geq 5T$ dan tiang termasuk pendek apabila $L \leq 2T$. Nilai karakteristik tiang dapat dihitung menggunakan persamaan (2.3) dengan nilai modulus elastisitas tiang dapat dihitung dengan persamaan (2.4) serta nilai momen inersia penampang pada persamaan (2.5), dengan nilai modulus *subgrade* horizontal konstan dapat dikorelasikan berdasarkan Tabel 2.13 dan Tabel 2.14.



Gambar 2.10 Kondisi Tiang: (a) *Fixed head*; (b) *Free head*

(Sumber: Das, 2011)

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{\eta_h}} \quad (2.3)$$

keterangan:

T = karakteristik panjang dari sistem tiang tanah

E_p = modulus elastisitas tiang

I_p = momen inersia penampang tiang

η_h = modulus *subgrade* horizontal konstan (kN/m³)

$$E_p = E \sqrt{f_c} \quad (2.4)$$

keterangan:

E = modulus elastisitas beton (MPa)

f_c = kuat tekan beton (MPa)

$$I_p = \frac{1}{64} \pi D^4 \quad (2.5)$$

Keterangan:

D = diameter tiang (m)

Tabel 2.13 Nilai Modulus Subgrade Horizontal Konstan pada Tanah Pasir

Soil	η_h(kN/m³)
<i>Dry or moist sand</i>	
<i>Loose</i>	1.800 – 2.200
<i>Medium</i>	5.500 – 7.000
<i>Dense</i>	15.000 – 18.000
<i>Submerged sand</i>	
<i>Loose</i>	1.000 – 1.400
<i>Medium</i>	3.500 – 4.500
<i>Dense</i>	9.000 – 12.000

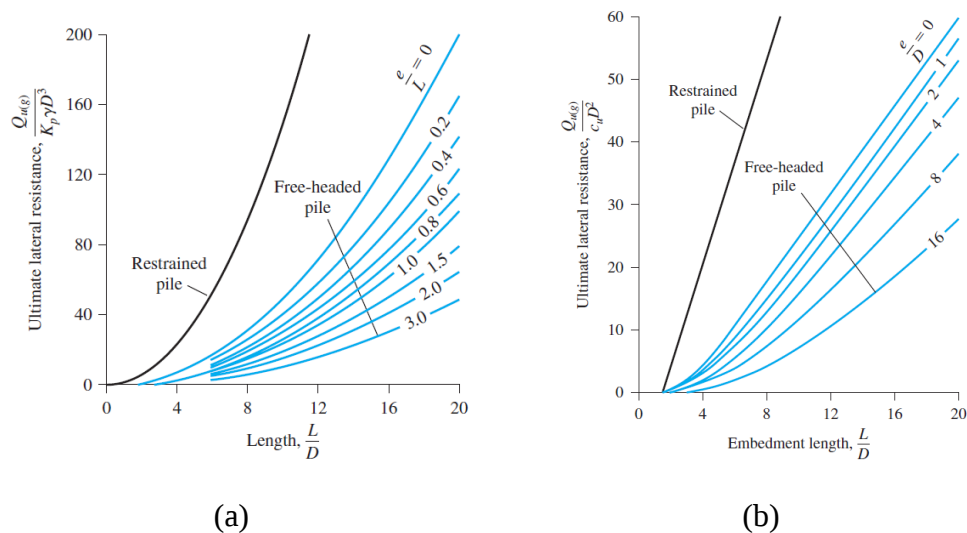
(Sumber: Das, 2011)

Tabel 2.14 Nilai Koefisien n_h untuk Pasir dan Lempung yang Terkonsolidasi secara Normal

Sand			
Relative Density D_r (%)	<50	50 – 75	>75
Suggested n_h values for both dry and partially saturated sands (MN/m ³)	2,5	7,5	20
Approximate n_h range for fully saturated sands (MN/m ³)	1,4 – 5,3	5 – 16,3	12 - 34
*For normally consolidated clays, the n_h coefficient ranges between 0,35 and 0,70 MN/m ³			

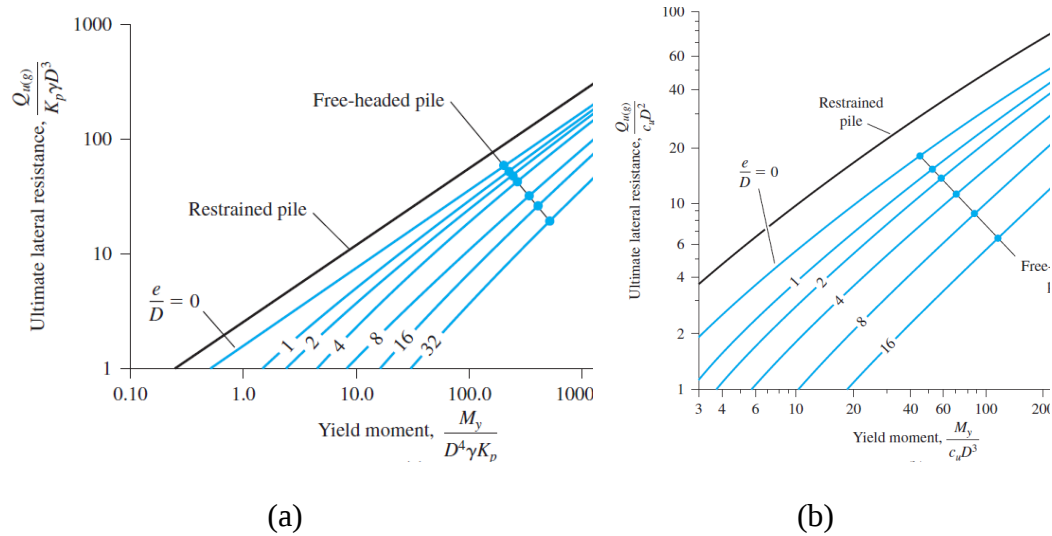
(Sumber: Kavvadas, 2008)

Grafik hubungan daya dukung lateral untuk tiang pendek berdasarkan kondisi tiang *free head* dan *fixed head* pada tanah pasir dan lempung dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Grafik Hubungan Panjang Tiang dengan Tahanan Lateral Ultimit untuk Tanah Pasir dan Lempung pada Tiang Pendek: (a) Tanah Pasir; (b) Tanah Lempung

(Sumber: Das, 2011)



(a) (b)

Gambar 2.12 Grafik Hubungan Panjang Tiang dengan Tahanan Lateral Ultimit untuk Tanah Pasir dan Lempung pada Tiang Panjang: (a) Tanah Pasir; (b) Tanah Lempung

(Sumber: Das, 2011)

Grafik hubungan daya dukung lateral untuk tiang panjang berdasarkan kondisi tiang *free head* dan *fixed head* Gambar 2.12 pada tanah pasir dan lempung. Dengan nilai koefisien tekanan pada tanah pasif, kohesi *undrained* dan *yield moment* dapat dicari dengan menggunakan persamaan (2.6), (2.7) dan (2.8).

$$K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (2.6)$$

keterangan:

K_p = koefisien tekanan pada tanah pasif

$$C_u = \frac{0,75q_u}{FS} \quad (2.7)$$

keterangan:

C_u = kohesi *undrained*

q_u = kekuatan kompresi tak terbatas

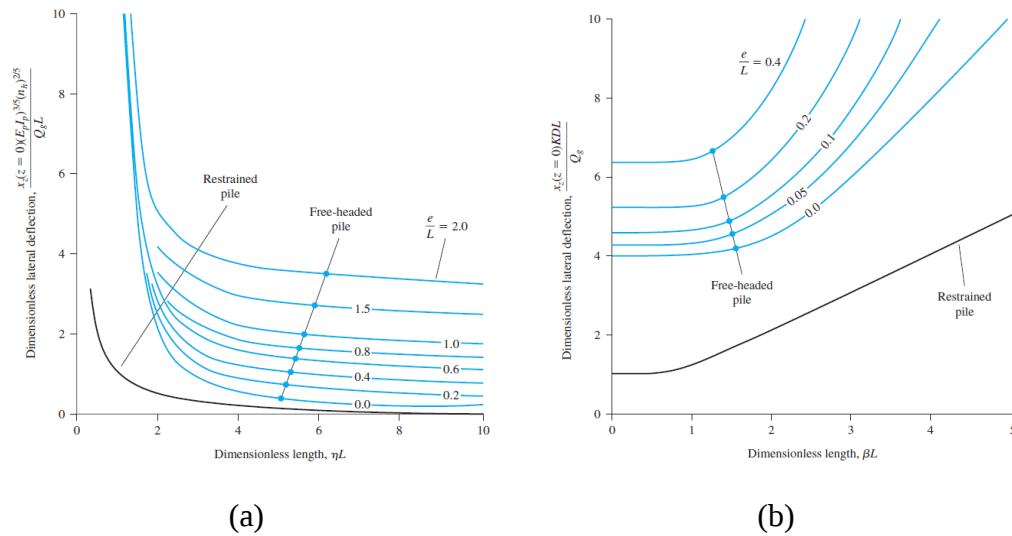
$$M_y = SF_y \quad (2.8)$$

keterangan:

M_y = *yield moment*

S = modulus penampang tiang pancang

F_y = tegangan leleh tiang pancang



Gambar 2.13 Grafik Defleksi Kepala Tiang: (a) Tanah Pasir; (b) Tanah Lempung
(Sumber: Das, 2011)

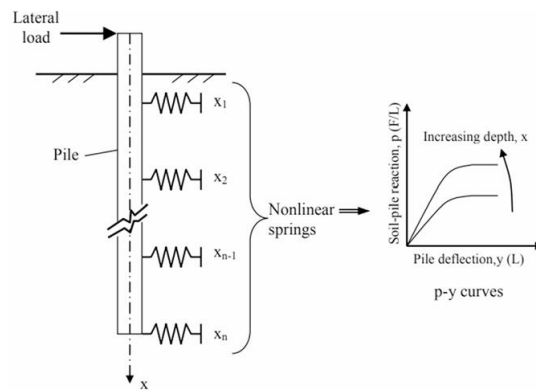
Nilai defleksi kepala tiang pada metode Broms pada tanah lempung dan pasir dapat menggunakan grafik pada Gambar 2.13 dilengkapi dengan persamaan (2.9) dan (2.10).

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{\eta_h}{4E_p I_p}} \quad (2.9)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{KD}{4E_p I_p}} \quad (2.10)$$

2.5.2 Metode P-Y

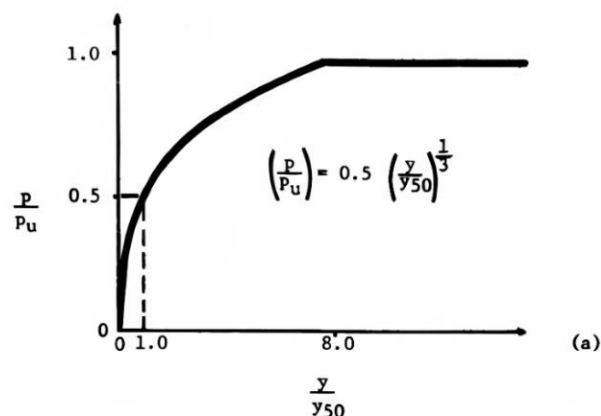
Metode P-Y merupakan analisis non linear yang mempresentasikan antara tekanan tanah lateral (p) dan defleksi lateral (y) pada sepanjang tiang yang dianalisis. Kurva P-Y yang dihasilkan dipengaruhi oleh jenis tanah, kedalaman dan kondisi material tiang. Metode P-Y ini banyak dipakai untuk mengkalibrasi kondisi sebenarnya yang diperoleh dari uji skala penuh (Mostafa, 2022). Pada Gambar 2.14 p sebagai tekanan tanah dan y sebagai defleksi lateral, dengan tiang pancang merupakan bagian yang didukung oleh pegas linear atau non linear.



Gambar 2.14 Analisis Tiang Pancang yang Dibebani secara Lateral menunjukkan Kurva Respon Tiang
(Sumber: Mostafa, 2022)

2.5.2.1 Metode P-Y untuk Tanah Lempung Lunak

Tiang pancang pada tanah lempung untuk pembebanan statis jangka pendek dapat dilihat pada ilustrasi Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Karakteristik Kurva P-Y Lempung Lunak di bawah Permukaan Air Pembebanan Statis
(Sumber: Wang & Reese, 1993)

Tahanan tanah ultimit pada tanah lempung pada persatuan panjang tiang pancang dapat menggunakan persamaan (2.11) atau (2.12) dengan memilih nilai terkecil yang dihasilkan. Nilai p_u dihitung pada setiap kedalaman kurva P-Y.

$$p_u = \left[3 + \frac{\gamma'}{c} x + \frac{j}{b} x \right] cb \quad (2.11)$$

$$p_u = 9cb \quad (2.12)$$

keterangan:

γ' = berat efektif rata rata tanah ke kurva P-Y

x = kedalaman dari permukaan tanah ke kurva P-Y

c = kuat geser tanah pada kedalaman x

b = diameter tiang

j = menurut Matlock (1970), nilai j 0,5 untuk lempung lunak, 0,25 lempung sedang

Perhitungan untuk nilai defleksi tiang pada setengah tahanan ultimit dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.13).

$$y_{50} = 2,5\varepsilon_{50}b \quad (2.13)$$

keterangan:

ε_{50} = regangan 50%

Perhitungan titik yang menggambarkan kurva P-Y dapat dihitung dengan menggunakan hubungan persamaan (2.14).

$$\frac{p}{p_u} = 0,5 \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.14)$$

Nilai p tetap konstan di luar $y = 8y_{50}$.

2.5.2.2 Metode P-Y untuk Tanah Pasir

Perhitungan pada tanah pasir untuk pembebanan statis jangka pendek dan pembebanan siklik dapat dilakukan dengan perhitungan awal menggunakan persamaan (2.15).

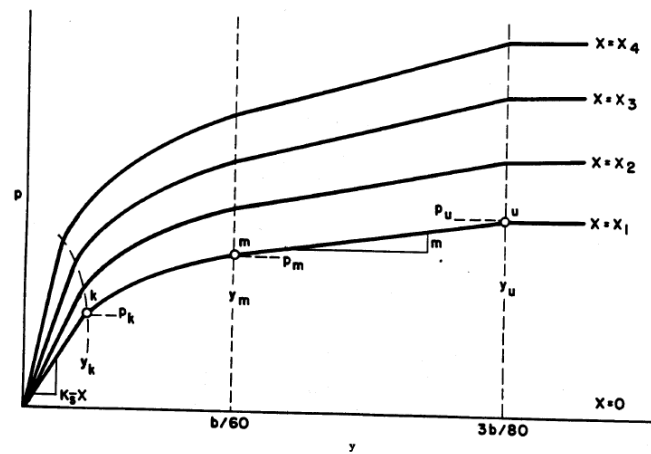
$$\alpha = \frac{\phi}{2}; \beta = 45 + \frac{\phi}{2}; K_o = 0,4; K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.15)$$

Perhitungan tahanan ultimit tanah per satuan panjang tiang pancang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.16) dan (2.17). Dimana, untuk

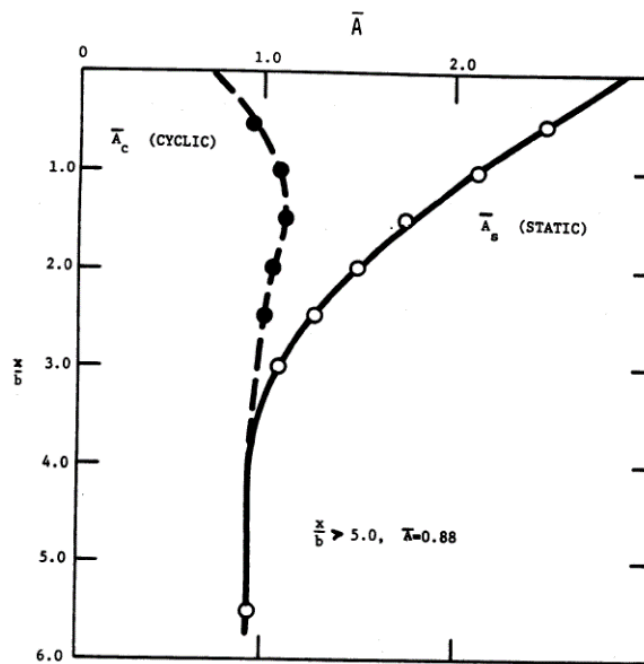
persamaan (2.16) digunakan untuk kondisi tanah berada di atas permukaan air dan persamaan (2.17) untuk kondisi tanah di bawah permukaan air.

$$p_{st} = \gamma x \left[\frac{K_o x \tan \phi \tan \beta}{\tan(\beta - \phi) \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi)} (b + x \tan \beta \tan \alpha) + K_o x \tan \beta (\tan \phi \sin \beta - \tan \alpha) - K_a b \right] \quad (2.16)$$

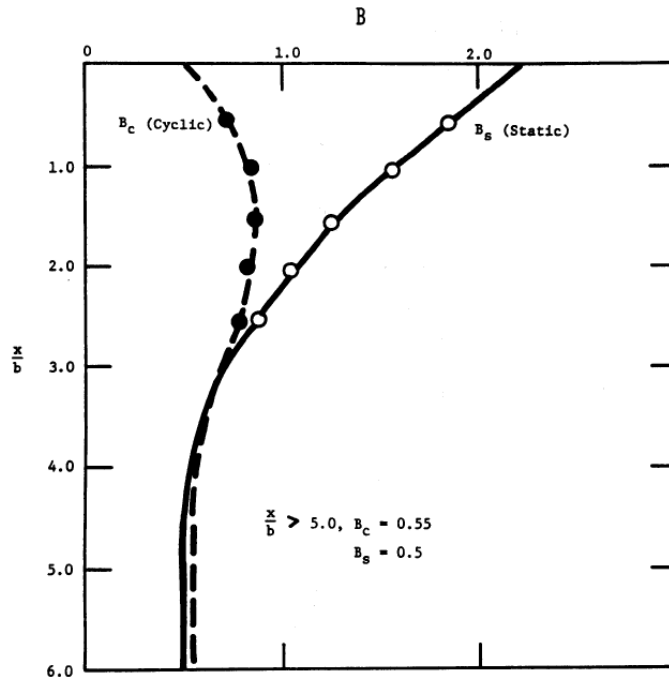
$$p_{sd} = K_a b \gamma x (\tan^8 \beta - 1) + K_o b \gamma x \tan \phi \tan^4 \beta \quad (2.17)$$



Gambar 2.16 Karakteristik Kurva P-Y untuk Pembebanan Statis dan Siklik
(Sumber: Wang & Reese, 1993)



Gambar 2.17 Nilai Koefisien $\bar{A}_s$ dan $\bar{A}_c$
(Sumber: Wang & Reese, 1993)



Gambar 2.18 Nilai Koefisien B untuk Tanah terhadap Kedalaman

(Sumber: Wang & Reese, 1993)

Setelah kedalaman telah dipilih untuk kurva P-Y, tetapkan y_u sebagai $3b/80$. Nilai p_u dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.18). Dengan Nilai A_s dihasilkan dari Gambar 2.17.

$$p_u = \bar{A}_s P_s \text{ atau } p_u = \bar{A}_c P_c \quad (2.18)$$

Untuk menghitung nilai y_m sebagai $b/60$. Nilai p_m dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.19). Dengan nilai A_s dihasilkan dari Gambar 2.18.

$$p_m = B_s P_s \text{ atau } p_m = B_c P_c \quad (2.19)$$

Perhitungan untuk garis lurus awal dari kurva P-Y dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.20).

$$p = (kx)y \quad (2.20)$$

Penetapan bagian parabola dari kurva P-Y dapat menggunakan perhitungan pada persamaan (2.21).

$$p = \bar{C}y^{1/n} \quad (2.21)$$

Nilai kemiringan garis antara titik m dan u dapat ditentukan dengan persamaan (2.22).

$$m = \frac{p_u - p_m}{y_u - y_m} \quad (2.22)$$

Kekuatan bagian parabola dengan menghitung menggunakan persamaan (2.23).

$$n = \frac{p_m}{my_m} \quad (2.23)$$

Mencari nilai koefisien C dengan persamaan (2.24).

$$\bar{C} = \frac{p_m}{y_m^{1/n}} \quad (2.24)$$

Penentuan titik K dengan menggunakan persamaan (2.25).

$$y_k = \left(\frac{\bar{C}}{kx} \right)^{(n/(n-1))} \quad (2.25)$$

2.6 Pengujian Fondasi Tiang Lateral

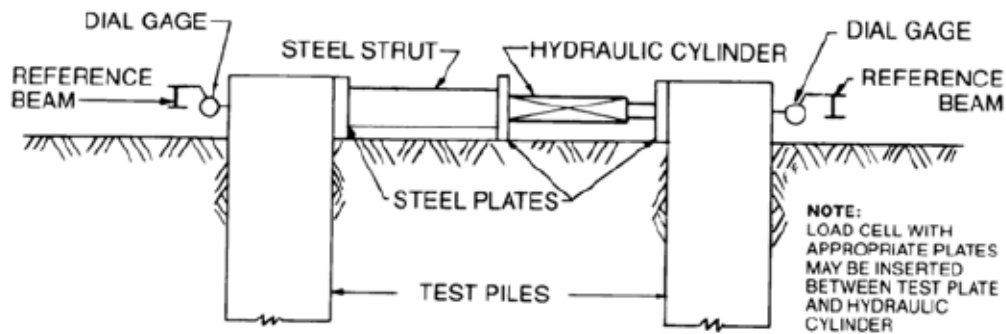
Menurut Hardiyatmo (2010) pengujian tiang dilakukan dengan tujuan untuk menentukan kapasitas dukung ultimit, kemudian untuk menentukan grafik hubungan beban dan penurunan di area beban yang telah direncanakan selain itu tujuan pengujian ini diharapkan keruntuhan pada fondasi tidak terjadi sampai beban yang telah direncanakan.

Pengujian fondasi tiang lateral merupakan pengujian dengan memberikan beban searah tegak lurus dengan tiang fondasi lateral sesuai dengan dengan beban lateral yang telah direncanakan untuk mengukur defleksi yang terjadi akibat beban lateral pada tiang yang diuji. Pengujian lateral ini sering dilakukan pada area dengan lokasi beban lateral yang sering terjadi.

Pengujian lateral pada tiang dilakukan berdasarkan standar ASTM D3966-07 (2011) dengan uji lateral statik dapat digambarkan dengan metode berikut:

1. *Pile to pile method*

Pile to pile method merupakan pengujian tiang fondasi dengan cara memanfaatkan tiang sebagai penahan yang dapat mentransfer beban lateral ke tiang yang dilakukan pengujian.



Gambar 2.19 Susunan Pengujian Dua Tiang secara Bersamaan

(Sumber: ASTM D3966-07, 2011)

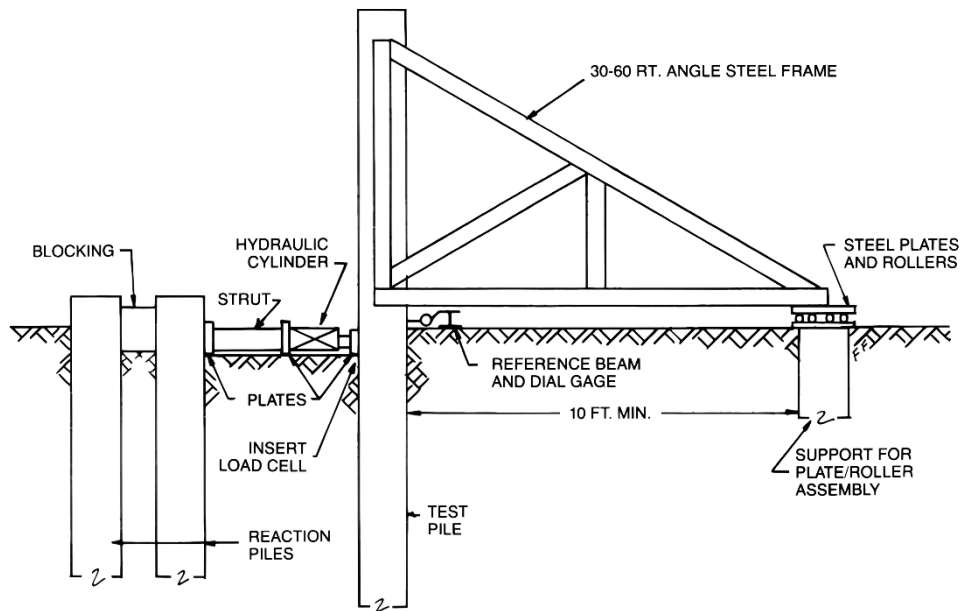
Metode kerja untuk pengujian *pile to pile* dilakukan dengan menerapkan gaya tekan atau gaya tarik tiang dengan dongkrak hidrolik. Tanpa pengaturan jarak dapat dimasukkan penyangga diantara tiang yang diuji. Semua penyangga dan penghalang dapat dilepaskan setelah penambahan beban pertama kali di tambahkan tanpa mengencangkan atau merubah penyangga.

2. *Kentledge method*

Kentledge method merupakan pengujian tiang fondasi dengan memanfaatkan benda mati sebagai penahan untuk memberikan beban lateral ke tiang yang diuji. Beban mati yang dapat digunakan dapat berupa dinding penahan tanah, balok beton maupun beban yang mampu menahan gaya lateral yang telah direncanakan sebelumnya.

Metode kerja uji lateral statik *kentledge* ini dengan cara tiang uji dipasang dengan jarak > 2 m. Tiang dipasang dengan menjepit pada bagian tiang memanjang di atas permukaan tanah. Rangka harus disusun untuk mencegah bagian atas tiang tidak berputar di bawah beban lateral maksimum yang di transfer ke tiang yang diuji. Bagian ujung rangka ditahan dengan daya dukung yang cukup untuk mengurangi defleksi vertikal pada ujung rangka. Jarak antara tiang uji dan penyangga tidak boleh kurang dari 3 m. Pelat bantalan harus berukuran sesuai untuk

menopang ujung rangka dengan jarak lateral maksimum yang diantisipasi. Rol baja harus memiliki spesifikasi yang kokoh dengan diameter > 50 mm untuk memungkinkan pergerakan horizontal bebas pada rangka di bawah tekanan untuk mengantisipasi akibat beban uji lateral maksimum.



Gambar 2.20 Uji Kepala Tetap untuk Uji Lateral Tiang Tunggal
(Sumber: ASTM D3966-07, 2011)