

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Tanah

Tanah berasal dari pelapukan fisika dan kimiawi batuan. Pelapukan fisika pada batuan terjadi karena siklus pembasahan dan pengeringan yang berulang sehingga menghancurkan batuan menjadi potongan-potongan kecil seperti pasir dan kerikil (Mulyono Tri, 2017).

Tanah adalah pondasi pendukung suatu bangunan, atau bahan konstruksi dari bangunan itu sendiri. Faktor-faktor yang mempengaruhi struktur dari tanah adalah bentuk, ukuran dan komposisi mineral dari butiran tanah serta sifat dan komposisi dari air tanah. Struktur tanah adalah suatu sifat yang menghasilkan respon terhadap perubahan eksternal didalam lingkungan seperti beban, air, dan temperatur. Berdasarkan sifat lekatnya, tanah diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu tanah kohesif dan non kohesif (Das, 1995). Tanah kohesif merupakan tanah dengan sifat lekat yang kuan antar butirannya seperti tanah lempung. Sedangkan tanah non kohesif merupakan jenis tanah yang lekatan antar butirnya sangatlah sedikit atau bahkan tidak ada seperti pasir.

2.2 Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah digunakan untuk mengelompokkan tanah-tanah sesuai dengan perilaku umum dari tanah pada kondisi fisis tertentu. Tanah-tanah yang dikelompokkan dalam urutan berdasar satu kondisi-kondisi fisis tertentu bisa saja mempunyai urutan yang tidak sama jika didasarkan kondisi fisis tertentu lainnya.

Klasifikasi tanah bertujuan untuk mengelompokkan tanah berdasarkan kesamaan dan kemiripan sifatnya, hal ini digunakan untuk mengetahui tentang karakteristik dari pemadatan, kekuatan suatu tanah, berat isi tanah dan lain sebagainya dalam bentuk suatu data. Untuk mengklasifikasi tanah bisa menggunakan beberapa sistem diantaranya yaitu sistem AASHTO (*American Association of Highway and Transportation Officials*) dan sistem USCS (*Unified Soil Classification System*).

Sistem klasifikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials Classification*) berguna untuk menentukan kualitas tanah dalam perencanaan timbunan jalan, *subbase*, dan *subgrade*. Sistem klasifikasi AASHTO membagi tanah ke dalam 8 kelompok, A-1 sampai A-7 termasuk sub-sub kelompok. Tanah-tanah dalam tiap kelompoknya dievaluasi terhadap indeks kelompoknya yang dihitung dengan rumus-rumus empiris.

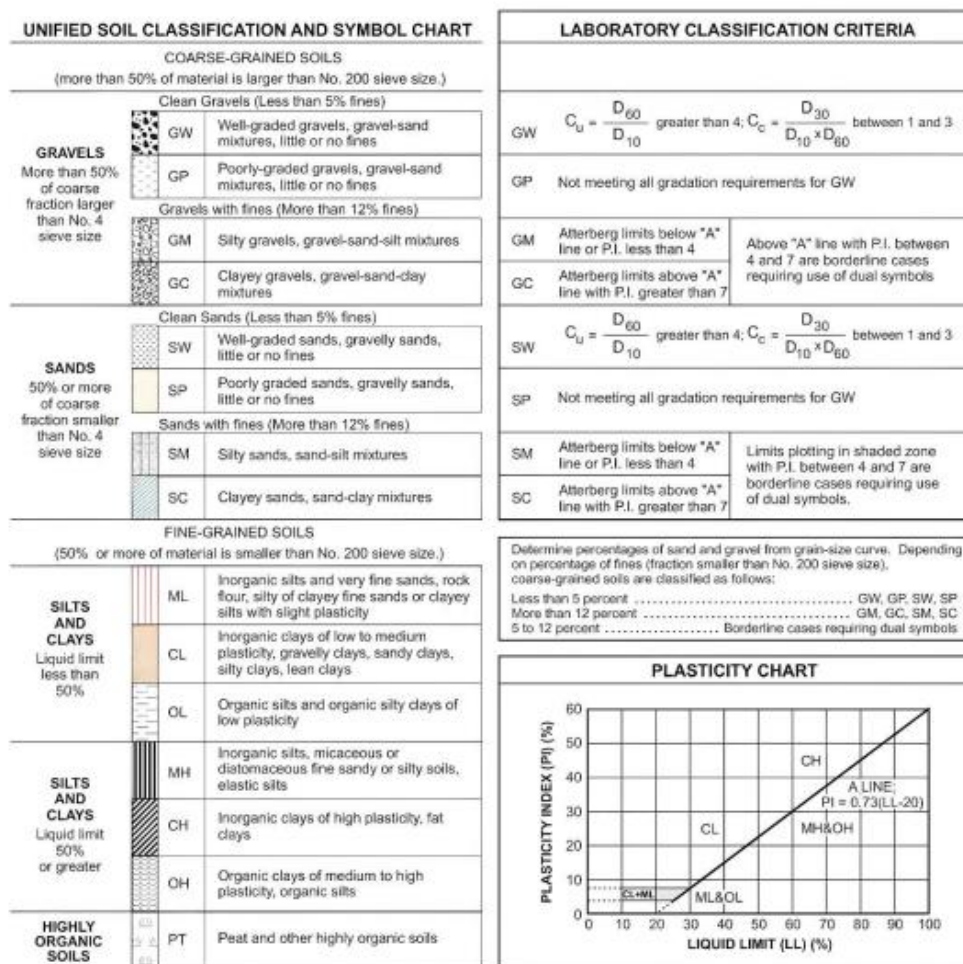
Tabel 2.1 Klasifikasi Tanah Sistem AASHTO

General Classification	Granular Materials (35% or less passing 0,075 mm sieve)						
Group Classification	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Sieve analysis, % passing:							
2 mm	50 max	-	-	-	-	-	-
0,425 mm	30 max	50 max	51 max	-	-	-	-
0,075 mm	10 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max
Fraction passing 0,425 mm:							
Liquid limit	-		Non - Plastic	40 max	41 max	40 max	41 max
Plasticity Index	6 max			10 max	10 max	11 max	11 max
Usual types of significant constituents	Stone fragments, gravel, sand		Fine sand	Silty or clayey gravel and sand			
General rating as a subgrade	Excellent to good						
General Classification	Silt-Clay Materials (> 35% passing 0,075 mm sieve)						
Group Classification				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Sieve analysis, % passing:							
2 mm				-	-	-	-
0,425 mm				-	-	-	-
0,075 mm				36 min	36 min	36 min	36 min
Fraction passing 0,425 mm:							
Liquid limit				40 max	41 max	40 max	41 max
Plasticity Index				10 max	10 max	11 max	11 max
Usual types of significant constituents				Silty soils		Clayey soils	
General rating as a subgrade				Fair to poor			
*Plasticity index for A-7-5 subgroup is equal to or less than liquid limit – 30.							
*Plasticity index of A-7-6 subgroup is greater than liquid limit – 30.							

Berdasarkan SNI 6371-2015, klasifikasi tanah *Unified Soil Classification System* (USCS) ialah sistem klasifikasi tanah yang paling terkenal di kalangan para ahli Teknik tanah dan fondasi. Sistem ini pertama-tama dikembangkan oleh

Casagrande (1948) dan dikenal sebagai sistem klasifikasi Airfield. Sistem ini mengelompokkan tanah ke dalam dua kelompok besar, yaitu:

1. Tanah berbutir kasar (*coarse grained soil*), yaitu tanah kerikil dan pasir dimana kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No. 200. Simbol dari kelompok tanah ini diberi simbol G (*gravel*) untuk kerikil, dan simbol S (*Sand*) untuk tanah berpasir.
2. Tanah berbutir halus (*fine grained soil*), yaitu tanah lebih dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No. 200. Simbol dari kelompok tanah ini diberi simbol M untuk lanau (*silt*) anorganik, C untuk lempung (*clay*) anorganik dan O untuk lanau-organik dan lempung-organik. Selain itu juga ada simbol PT untuk tanah gambut (*peat*), muck dan tanah-tanah lain dengan kadar organik yang tinggi.



Gambar 2.1 Klasifikasi Tanah Sistem USCS

(Sumber: Hardiyatmo, 2002)

2.3 Karakteristik Tanah

Perencanaan fondasi diperlukan penyelidikan tanah terlebih dahulu agar mengetahui bagaimana karakteristik tanah tersebut (Fahriana et al., 2019). Beberapa karakteristik tanah antara lain yaitu ukuran butiran tanah, berat jenis tanah, kadar air tanah, kohesi, angka pori, serta sudut geser pada tanah.

Karakteristik tanah secara umum dapat dibedakan menjadi sifat fisik dan sifat mekanik. Sifat fisik tanah meliputi parameter seperti, berat isi, kadar air, porositas, distribusi ukuran butiran, serta batas atterberg yang menggambarkan kondisi dasar tanah tanpa pengaruh pembebanan. Sementara itu, sifat mekanik mencakup kuat geser tanah, kompresibilitas, konsolidasi, modulus elastisitas, permeabilitas, hingga daya dukung, yang secara langsung menentukan perilaku tanah ketika menerima beban dari struktur.

2.3.1 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.

Tabel 2.2 Berat Isi 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>	16,0	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>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>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	

(Sumber: Ameratunga et al., 2016)

2.3.2 Kohesi

Kohesi merupakan gaya tarik menarik antar partikel tanah. Bersama dengan sudut geser dalam, kohesi merupakan kuat geser tanah yang menentukan ketahanan tanah terhadap deformasi akibat tegangan yang bekerja pada tanah dalam hal ini berupa gerakan lateral tanah. Nilai ini didapat dari pengujian *triaxial test* dan *direct shear test* (Das, 1995).

Tabel 2.3 Nilai Kohesi Tanah

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

(Sumber: Ameratunga et al., 2016)

2.3.3 Sudut Geser

Sudut geser adalah sudut kemiringan bidang geser maksimum pada saat tanah mulai bergeser atau terjadi pergerakan tanah. Sudut geser bergantung pada kohesi dan kekuatan geser antar partikel tanah.

Tabel 2.4 Sudut Geser Tanah

<i>State of Packing</i>	N-SPT	ϕ (degrees)
<i>Very Loose</i>	< 4	< 30
<i>Loose</i>	4 – 10	30 – 35
<i>Medium Dense</i>	10 – 30	35 – 40
<i>Dense</i>	30 – 50	40 – 45
<i>Very Dense</i>	> 50	> 45

(Sumber: Look, 2007)

2.3.4 Angka Pori

Angka pori (e) adalah rasio antara perubahan volume yang terjadi pada tanah terhadap volume awal tanah, ketika tanah itu mulai mengalami deformasi. Angka pori menunjukkan seberapa besar ruang kosong yang disebut pori-pori tanah terhadap ruang padat. Adapun nilai tipikal untuk angka pori, *moisture content* pada kondisi tersaturasi dan berat isi kering tanah dapat diketahui dari Tabel 2.4

Tabel 2.5 Nilai Angka Pori

<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	10	21

(Sumber: Das & Sobhan, 2014)

2.3.5 Angka Poison (μ)

Perbandingan antara kontraksi lateral terhadap regangan longitudinal, jika suatu bahan ditarik secara linear. Dengan kata lain, rasio ini menghitung

perbandingan antara penyempitan benda terhadap pertambahan panjang akibat tarikan. Jadi, angka poisson adalah nilai perbandingan antara regangan horizontal dan regangan vertikal.

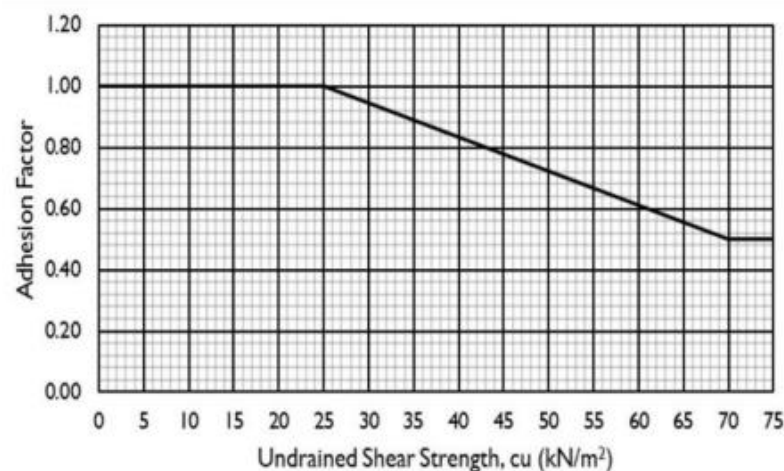
Tabel 2.6 Nilai Angka Poison

Material	Poisson's Ratio
Lempung jenuh (<i>undrained</i>)	0,5
Lempung jenuh (<i>drained</i>)	0,2 – 0,4
Pasir rapat	0,3 – 0,4
Pasir lepas	0,1 – 0,3
Loess	0,1 – 0,3
Es	0,36
Alumunium	0,35
Baja	0,29
Beton	0,15

(Sumber: Das & Sobhan, 2014)

2.3.6 Adhesion Factor

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 2.2 Grafik Faktor Adhesi Metode API RP2A

(Sumber: American Petroleum Institute, 1987)

2.3.7 Koefisien Tekanan Tanah Lateral (K_0)

Koefisien tekanan tanah lateral (K_0) adalah perbandingan antara tegangan horizontal efektif terhadap tegangan vertikal efektif dalam kondisi tanah diam, artinya tanah tidak mengalami perubahan lateral. Nilai K_0 menunjukkan seberapa besar tekanan tanah horizontal yang bekerja terhadap suatu struktur saat tanah stabil atau tidak terganggu.

Koefisien tekanan tanah lateral (K_0) merupakan nilai koefisien tekanan tanah lateral pada lapisan atas dan bawah tanah pasir. Dalam metode API RP2A disarankan nilai K_0 0,8 untuk tiang pancang dengan pipa terbuka atau open ended piles, dan nilai K_0 1,0 direkomendasikan untuk tiang dengan perpindahan penuh atau full displacement piles (Ensoft Inc., 2022a).

2.3.8 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. Nilai ϵ_{50} digunakan untuk menganalisis bentuk dan kekakuan grafik p_y , yang menggambarkan hubungan antara tekanan tanah lateral dan defleksi tiang.

Tabel 2.7 Nilai Strain Factor ϵ_{50}

<i>Soil</i>	Strain Factor (ϵ_{50})
<i>Soft Clay</i>	0,020
<i>Medium Clay</i>	0,010
<i>Stiff Clay</i>	0,007
<i>Very Stiff Clay</i>	0,005
<i>Hard Clay</i>	0,004
<i>Limestone</i>	0,001

(Sumber: Wang & Reese, 1993)

2.3.9 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.

penentuan nilai k memiliki pengaruh yang signifikan terhadap hasil analisis interaksi tanah–tiang, terutama dalam evaluasi besarnya defleksi dan distribusi momen pada tiang. Penggunaan nilai k yang terlalu kecil dapat menghasilkan estimasi defleksi yang berlebihan, sedangkan nilai k yang terlalu besar berpotensi menghasilkan analisis yang tidak konservatif. Dengan demikian, pemilihan nilai modulus tanah lateral (k) harus dilakukan secara cermat dan didasarkan pada data yang representatif agar hasil analisis yang diperoleh dapat dipertanggungjawabkan secara teknis.

Tabel 2.8 Nilai k untuk Tanah Kohesif

<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

(Sumber: Wang & Reese, 1993)

Tabel 2.9 Nilai k untuk Tanah non Kohesif

<i>Soil</i>	<i>Submerged Sand (Kpa/m)</i>	<i>Sand Above WT (Kpa/m)</i>
<i>Loose</i>	5.430	6.790
<i>Medium</i>	16.300	24.430
<i>Dense</i>	33.900	61.000

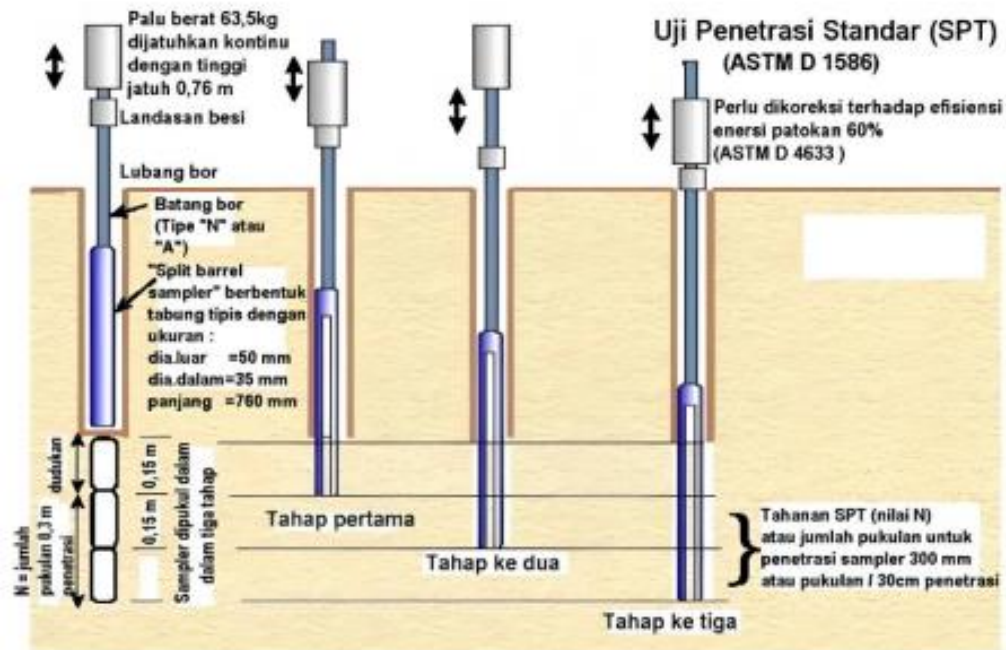
(Sumber: Wang & Reese, 1993)

2.4 Penyelidikan Tanah dengan *Standard Penetration Test* (SPT)

Tanah berfungsi sebagai pemikul beban sehingga perlu dianalisis terkait sifat fisis dan sifat mekanis tanah. Penyelidikan tanah bertujuan untuk memeriksa keadaan tanah dan jenis lapisannya. Ada dua jenis penyelidikan tanah yaitu penyelidikan lapangan yang meliputi uji sondir, uji penetrasi standar (SPT), dan pemeriksaan laboratorium (Maharani & Fadhillah, 2023).

Standard Penetration Test dilakukan pada lubang bor setelah pengambilan sampel tanah pada kedalaman yang berbeda, dengan interval pengukuran. Dalam

penelitian ini, pendekatan pengujian dilakukan untuk memperoleh parameter yang terkait dengan ketahanan penetrasi lapisan tanah dari lapangan. Uji SPT ini dilakukan untuk mengetahui nilai dari kerapatan relatif, dengan prosedur uji tercantum pada ASTM D1586 dan SNI 4153:2008.



Gambar 2.3 Skema Urutan Uji Penetrasi Standar (SPT)

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).

2.5 Fondasi Dalam

Fondasi dalam digunakan jika beban pada bangunan sangat besar serta lokasi kedalaman tanah keras sangat jauh dari permukaan tanah. Umumnya kedalaman fondasi dalam lebih besar disbanding lebarnya ($D > B$). Beban struktur atas disalurkan dari fondasi ke lapisan yang lebih dalam sampai mencapai jenis tanah yang dapat menahan beban tersebut.

2.6 Fondasi Tiang Pancang

Penggunaan pondasi tiang pancang sebagai pondasi bangunan apabila tanah yang berada di bawah dasar bangunan tidak memiliki daya dukung (*bearing capacity*) yang cukup untuk memikul berat bangunan dan beban yang bekerja padanya. Atau apabila tanah yang memiliki daya dukung yang cukup untuk memikul berat bangunan dan seluruh beban yang bekerja pada lapisan yang sangat dalam dari permukaan tanah, kedalaman mencapai > 8 m.

Bambang Surendro (2014) menguraikan tentang jenis-jenis pondasi tiang pancang yang digolongkan berdasarkan bahan/material yang dipergunakan untuk pembuatan tiang dan cara pembuatannya. Menurut bahan/material yang digunakan, tiang pancang dibedakan menjadi empat macam yaitu tiang pancang kayu, tiang pancang beton, tiang pancang baja, dan tiang pancang komposit (kayu dengan beton atau baja dengan beton). Sedangkan menurut cara pembuatannya dibedakan menjadi dua macam yaitu:

1. Pondasi tiang dibuat ditempat pekerjaan (*cast in place pile*).
2. Pondasi tiang yang dibuat atau disiapkan di tempat lain, kemudian dibawa ke lokasi proyek untuk dimasukkan kedalam tanah dengan cara ditumbuk atau dipancang (*precast pile*).

2.6.1 Fondasi Tiang Pancang Kayu

Jenis tiang yang sudah lama digunakan adalah tiang yang dibuat dari kayu. Pada umumnya tiang kayu digunakan pada pekerjaan yang sifatnya sementara. Namun ada juga tiang kayu digunakan secara permanen. Panjang tiang kayu pada umumnya berkisar antara 6 sampai dengan 8 meter dengan diameter antara 15 sampai dengan 20 centimeter. Bahan kayu dipergunakan harus cukup tua, berkualitas baik (sesuai dengan penggunaannya sebagai tiang pancang), tidak cacat, dan lurus yang setidaknya garis sumbu yang menghubungkan antara pangkal dan ujung

masih dalam kayu. Tiang kayu harus diperiksa terlebih dahulu sebelum dipancang, yaitu untuk memastikan bahwa tiang pancang kayu tersebut betul-betul memenuhi ketentuan dari bahan dan toleransi yang diijinkan. Bila menyimpang dari ketentuan yang diijinkan, bisa menyebabkan kesulitan dalam pemancangan, ataupun tiang pancang kayu tidak bisa tahan lama.

Sebelum pemancangan, untuk mencegah terjadinya kerusakan pada saat pemancangan, maka kepala tiang pancang dipasang cincin baja atau besi yang kuat atau dengan metode lainnya yang jauh lebih efektif. Setelah pemancangan selesai, kepala tiang pancang dipotong tegak lurus terhadap panjangnya kemudian diberi bahan pengawet sebelum pur (*pile cap*) dipasang. Kepala tiang pancang harus tertanam dalam pur dengan kedalaman yang cukup sehingga dapat memindahkan gaya. Tebal beton di sekeliling tiang pancang paling sedikit 15 centimeter.

Tiang pancang harus dilengkapi dengan sepatu yang cocok untuk melindungi ujung tiang selama pemancangan, kecuali bilamana seluruh pemancangan dilakukan pada tanah yang lunak. Sepatu benar-benar konsentris (pusat sepatu sama dengan pusat tiang pancang). Dan dipasang dengan kuat pad ujung tiang. Bidang kontak antara sepatu dan kayu harus cukup untuk menghindari tekanan yang berlebihan selama pemancangan

2.6.2 Fondasi Tiang Pancang Baja

Pondasi tiang pancang baja biasanya berbentuk profil H ataupun berbentuk pipa atau kotak baja. Pada tiang pancang baja pipa, dapat dipilih dengan ujung terbuka bebas ataupun tertutup. Bilamana tiang pancang pipa atau kotak digunakan, dan akan diisi dengan beton, mutu beton tersebut minimal harus K250.

Tiang pancang baja mempunyai potensi kerawanan terhadap korosi. Berkaitan hal tersebut, maka perlu dilakukan penelitian sebelumnya pada bagian mana yang mungkin terjadi korosi. Untuk menghindarinya ruas-ruas yang mungkin terkena korosi harus dilindungi dengan pengecatan menggunakan lapisan pelindung yang telah disetujui dan/atau digunakan logam yang lebih tebal. Apabila tiang dipancang pada tanah asli yang kadar oksigennya rendah, maka umur tiang bias tahan lama. Akan tetapi jika ada bagian tiang pancang yang berhubungan langsung dengan air, maka harus diberi perlindungan dengan melapisi beton agar besi dapat tahan terhadap karat. Sebelum tiang baja di pancang, pada kepala tiang harus

dipasang topi pemancang (*driving cap*), yang berfungsi untuk menjaga rusaknya kepala tiang akibat pukulan dan untuk mempertahankan sumbu tiang pancang segaris dengan sumbu palu. Setelah selesai pemancangan, tiang pancang dengan panjang yang cukup harus ditanamkan ke dalam pur (*pile cap*).

Apabila panjang tiang yang dibutuhkan lebih panjang dari panjang tiang yang tersedia, maka diperlukan perpanjangan. Perpanjangan tiang baja dilakukan dengan penyambungan dengan cara pengelasan. Pondasi tiang pancang baja pada umumnya ringan, kuat dan mampu menahan beban yang berat. Penyambungan tiangpun dapat dilakukan dengan mudah. Namun pondasi tiang pancang baja mempunyai kelemahan, yaitu dapat terjadinya korosi pada tiang baja, yaitu akibat pengaruh dari asam maupun air. Namun penelitian menunjukkan, bahwa pemancangan terhadap tanah alamiah tak terganggu, maka korosi menjadi tidak masalah. Namun, jika pemancangan dilakukan terhadap tanah urugkan, maka besar kemungkinannya terjadinya korosi pada tiang pancang baja.

2.6.3 Tiang Pancang Beton

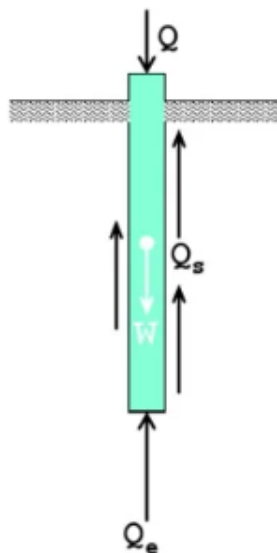
Sebagaimana telah diuraikan sebelumnya, bahwa tiang pancang beton bila ditinjau dari segi pembuatannya dibedakan menjadi dua macam yaitu tiang pancang beton yang dibuat di lokasi pekerjaan (*cast in place pile*) dan tiang beton yang dibuat di tempat lain (*precast pile*). Tiang pancang beton, baru dapat dipancang minimal setelah beton berumur 28 hari, karena beton akan mencapai tingkat pengerasan secara sempurna setelah 28 hari, sehingga sebelum mencapai 28 hari beton akan mempunyai kuat tekan yang berbeda. Untuk mengetahui perbandingan kuat tekan beton berkaitan dengan umur, dapat menggunakan tabel konversi beton untuk umur 3,7,14,21 dan 28 hari.

Karena tegangan tarik beton adalah kecil, sedangkan berat sendiri beton adalah besar, maka tiang pancang beton ini haruslah diberi tulangan yang cukup memadai, sehingga dapat menahan momen lentur yang akan timbul pada waktu pengangkatan dan pemancangan. Penampang tiang pancang beton banyak dijumpai di lapangan pada umumnya berbentuk bulat pejal, bulat berongga, bujur sangkar pejal, segitiga pejal, bujur sangkar berongga, segidelapan pejal, dan segidelapan berongga.

Tiang pancang segitiga yang ditemui di lapangan antara lain, ukuran sisi 22cm, 28cm, dan 32cm, dengan panjang 3m, 6m, 9m, 12m. Tiang pancang berbentuk penampang segitiga berukuran sisi 28cm mampu menopang beban 25 – 30 ton, tiang pancang berbentuk penampang segitiga berukuran sisi 32cm mampu menopang beban 35 – 40 ton.

2.7 Daya Dukung Fondasi Tiang

Daya dukung fondasi yaitu kemampuan fondasi untuk mendukung beban yang diterapkan dari struktur di atasnya (Yuliawan & Rahayu, 2018). Ini adalah salah satu aspek paling kritis dalam desain dan konstruksi fondasi dalam. Fondasi tiang digunakan ketika tanah di dekat permukaan tidak cukup kuat untuk mendukung beban struktur, sehingga beban harus dipindahkan ke lapisan tanah yang lebih dalam dan lebih stabil.



Gambar 2.4 Daya Dukung Fondasi

Daya dukung fondasi dibagi menjadi 2 jenis utama yaitu daya dukung aksial dan daya dukung lateral. Daya dukung aksial adalah kapasitas fondasi tiang dalam menahan beban vertikal (arah sumbu tiang). Beban ini bisa berupa beban mati (*dead load*), beban hidup (*live load*), dan beban dari struktur atas lainnya. Sedangkan daya dukung lateral adalah kapasitas tiang dalam menahan beban horizontal, misalnya dari angin, gempa, tekanan tanah aktif, atau beban eksentris dari struktur atas.

Daya dukung aksial terdiri dari daya dukung ujung (*end bearing*) yang memberi reaksi dari tanah keras atau batuan di bawah ujung tiang dan daya dukung

selimut (*skin friction*) yang memberi tahanan gesekan antara permukaan tiang dan tanah sepanjang sisi tiang.

$$Q_{ult} = Q_s + Q_e \quad (2.1)$$

Dengan:

Q_{ult} = Daya dukung aksial ultimit

Q_s = Daya dukung selimut

Q_e = Daya dukung ujung

2.7.1 Daya Dukung Ujung

Daya dukung ujung adalah kapasitas tanah atau batuan di bawah ujung fondasi dalam untuk menahan beban vertikal yang diteruskan dari struktur melalui tiang pancang atau fondasi bor. Ini adalah salah satu dari dua komponen utama daya dukung total fondasi dalam, yang lainnya adalah daya dukung gesekan sisi (*skin friction*) (Bowles, 1997).

Pada Penelitian ini perhitungan daya dukung ujung dihitung menggunakan metode *american petroleum institute* (API). Metode API untuk lempung pada dasarnya didasarkan pada penggunaan kuat geser tak terdrainase dan sebagian besar bersifat empiris. Prosedur API untuk pasir juga sangat empiris, tetapi teknik tegangan efektif secara alami digunakan karena tidak diasumsikan adanya tekanan air pori berlebih.

a. Rumus daya dukung ujung untuk tanah kohesif

Untuk tiang tumpuan ujung di tanah liat, q dalam $1b/ft^2$ (kPa) harus sama dengan $9c$. Jika profil kekuatan di bawah ujung tiang tidak seragam, maka c yang digunakan harus mencerminkan penyesuaian yang tepat.

$$Q_e = q \cdot A_p \quad (2.2)$$

$$q = 9c \quad (2.3)$$

Dimana:

Q_e = Daya dukung ujung

c = Nilai kohesi tanah

A_p = Luas penampang ujung tiang pancang

b. Rumus daya dukung ujung untuk tanah non-kohesif

$$q = \sigma'_v \cdot N_q \quad (2.4)$$

Dimana

σ'_v = Tegangan vertikal efektif di ujung tiang

N_q = Faktor daya dukung

2.7.2 Daya Dukung Selimut

Daya Dukung Selimut adalah resistensi yang ditawarkan oleh tanah di sepanjang permukaan samping fondasi dalam, seperti tiang pancang atau fondasi bor, terhadap beban vertikal yang diteruskan dari (Kurniawan & Siregar, 2023). Aspek ini sangat penting terutama ketika fondasi ditanam di tanah yang memiliki kekuatan yang bervariasi di kedalaman yang berbeda.

a. Rumus daya dukung selimut untuk tanah kohesif

Perhitungan daya dukung selimut dengan metode API terdapat 2 metode. Metode API yang pertama untuk lempung yang sangat plastis, f dapat sama dengan c untuk lempung yang kurang terkonsolidasi dan lempung yang terkonsolidasi normal. Untuk lempung *over consolidated*, f tidak boleh melebihi 1 kips per kaki persegi (48 kPa) untuk penetrasi dangkal atau c setara dengan lempung yang terkonsolidasi normal untuk penetrasi yang lebih dalam, mana pun yang lebih besar.

$$Q_s = \int_0^L f_x \cdot d \cdot A_s \quad (2.5)$$

Dimana:

Q_s = Daya dukung selimut (kN)

L = Penetrasi tumpukan di bawah permukaan tanah (m)

f_x = Satuan tahanan dalam tanah liat pada kedalaman x , diukur dari permukaan tanah (kPa)

A_s = Luas permukaan sisi tumpukan (m^2)

Dengan nilai f sebagai berikut:

$$C_n \bar{P} = K_c = f(PI) \quad (2.6)$$

Dimana:

C_n = kuat geser *undrained* dari lempung yang terkonsolidasi normal

$\bar{P} = \gamma =$ berat satuan efektif tanah

K_c = konstanta = 0,25

Metode API yang kedua menyatakan untuk jenis lempung lainnya, f harus dianggap sama dengan c untuk c kurang dari atau sama dengan 1/2 kips

per kaki persegi (24 kPa). Untuk c yang melebihi 1/2 kips per kaki persegi (24 kPa) tetapi kurang dari atau sama dengan 1,5 ton per kaki persegi (72 kPa), rasio f terhadap c harus menurun secara linear dari satu pada c sama dengan 1/2 kips per kaki persegi (24 kPa) menjadi 1/2 pada c sama dengan 1,5 kips per kaki persegi (72 kPa). Untuk c yang melebihi 1,5 kips per kaki persegi (72 kPa), f harus dianggap sebagai 1/2 dari c . Penjelasan rinci tentang penerapan Metode 2 ditunjukkan pada persamaan (2.7).

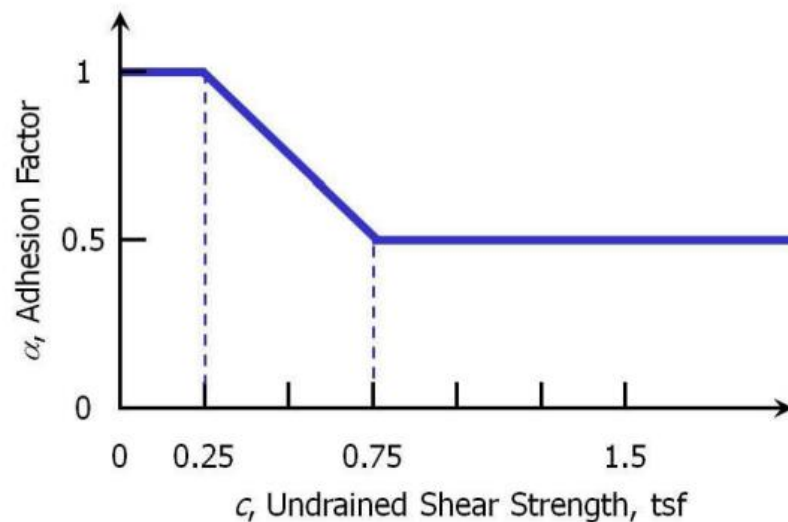
$$f_x = \alpha_x C_x \quad (2.7)$$

Dimana:

f_x = Satuan tahanan dalam tanah liat pada kedalaman x , diukur dari permukaan tanah

α_x = Faktor adhesi

C_x = Kohesi *undrained* pada kedalaman x



Gambar 2.5 Nilai α

- b. Rumus daya dukung selimut untuk tanah non-kohesif

$$f = k(\tan \delta) \sigma'_v = \beta \bar{P}_0 \quad (2.8)$$

Dimana:

K = Koefisien tanah lateral ($K_0 - 1,8K_0$)

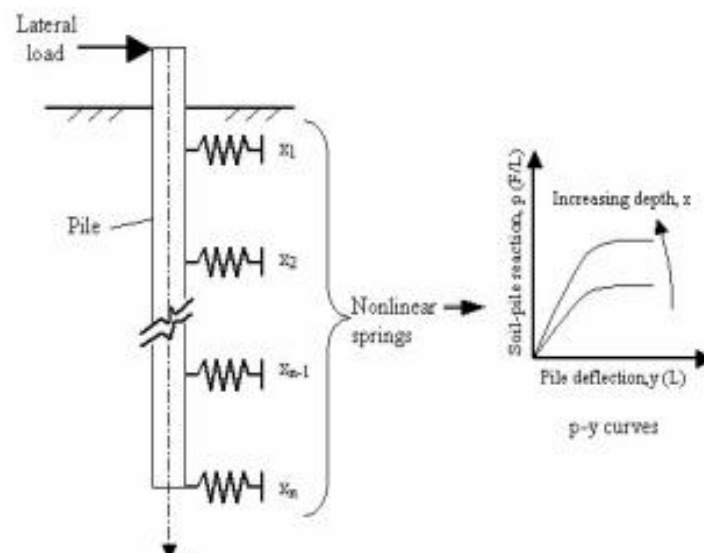
σ'_v = Tegangan vertikal efektif

δ = Sudut geser antara tiang dan tanah

2.7.3 Daya Dukung Lateral

Menurut Bowles (1997), daya dukung lateral tiang dipengaruhi oleh interaksi antara tiang dan tanah di sekitarnya, di mana tanah memberikan reaksi perlawanan terhadap perpindahan tiang yang disebut sebagai *soil reaction* atau tekanan tanah lateral.

Metode *p-y curve* merupakan salah satu pendekatan yang digunakan untuk menganalisis defleksi lateral pada fondasi tiang. Dalam metode ini, hubungan antara beban lateral dan besar defleksi yang terjadi pada interaksi tanah dengan fondasi tiang digambarkan melalui kurva *p-y*. Pada kurva tersebut, sumbu *p* menunjukkan besarnya tahanan lateral tanah per satuan panjang tiang, sedangkan sumbu *y* merepresentasikan defleksi lateral yang dialami tiang (Mostafa, 2022).



Gambar 2.6 Tiang Dibebani Secara Lateral yang Menunjukkan Konsep Kurva Respon Tanah-Struktur (*p-y* model)

Metode analisis *p-y curve* memodelkan tiang sebagai elemen yang dibagi menjadi beberapa segmen dengan panjang seragam, sementara tanah dianggap sebagai deretan pegas nonlinier (Pang, 2022). Pada penelitian ini, perhitungan kapasitas dukung lateral dilakukan menggunakan metode *p-y curve* dengan bantuan perangkat lunak LPILE, untuk menganalisis kapasitas dukung lateral menggunakan metode *p-y curve*.

a. Metode P-Y untuk Tanah Lempung Lunak

Tahanan tanah ultimit pada tanah lempung pada persatuan panjang tiang pancang dapat menggunakan persamaan (2.9) atau (2.10) dengan memilih

nilai terkecil yang dihasilkan. Nilai p_u dihitung pada setiap kedalaman kurva P-Y.

$$P_u = \left[3 + \frac{\gamma'}{c}x + \frac{j}{b}x \right] cb \quad (2.9)$$

$$P_u = 9cb \quad (2.10)$$

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 (2.11).

$$y_{50} = 2,5\varepsilon_{50}b \quad (2.11)$$

keterangan:

ε_{50} = regangan 50%

Perhitungan titik yang menggambarkan kurva P-Y dapat dihitung dengan menggunakan hubungan persamaan (2.12).

$$\frac{P}{P_u} = 0,5 \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.12)$$

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

b. Metode P-Y untuk Tanah Pasir

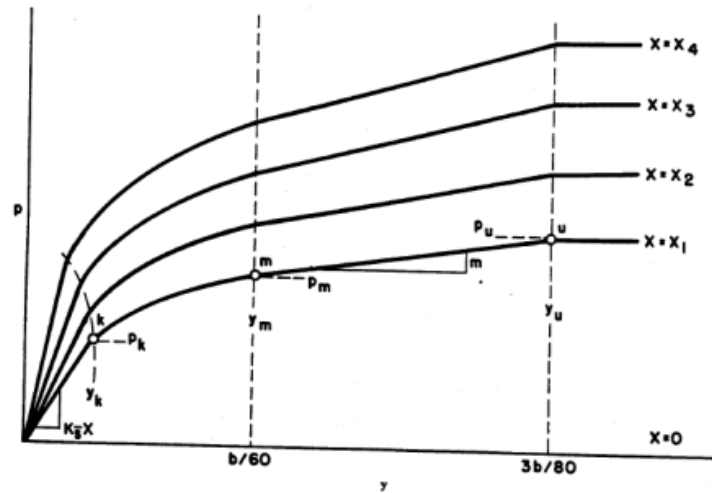
Perhitungan pada tanah pasir untuk pembebanan statis jangka pendek dan pembebanan siklik dapat dilakukan dengan perhitungan awal menggunakan persamaan (2.13)

$$\alpha = \frac{\phi}{2}; \beta = 45 + \frac{\phi}{2}; K_0 = 0,4; K_a = \tan^2(45 - \frac{\phi}{2}) \quad (2.13)$$

Perhitungan tahanan ultimit tanah per satuan panjang tiang pancang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.14) dan (2.15). Dimana, untuk persamaan (2.14) digunakan untuk kondisi tanah berada di atas permukaan air dan persamaan (2.15) untuk kondisi tanah di bawah permukaan air.

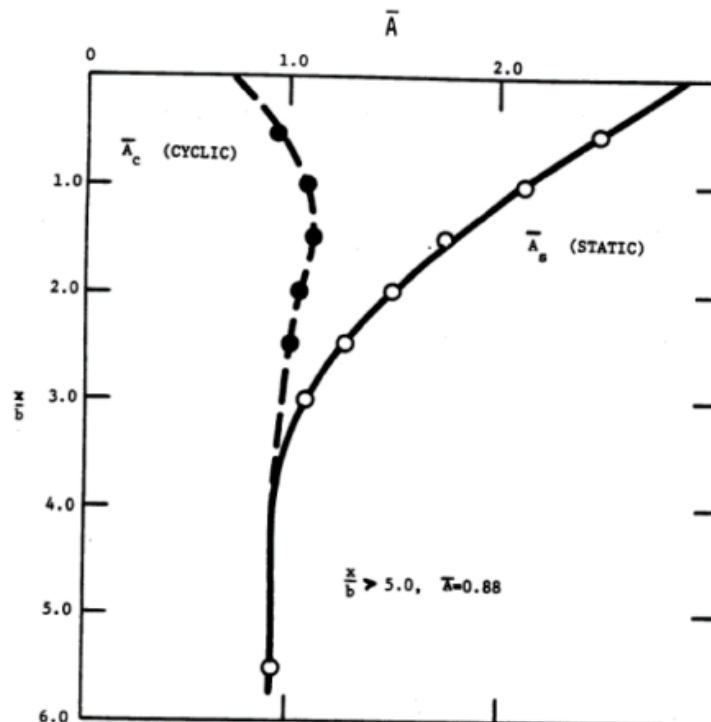
$$P_{st} = yx \left[\frac{K_0 x \tan \phi \tan \beta}{\tan(\beta - \phi) \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi)} (b + x \tan \beta \tan \alpha) + K_0 x \tan \beta (\tan \phi \sin \beta - \tan \alpha) - K_a b \right] \quad (2.14)$$

$$P_{sd} = K_a b y x (\tan^8 \beta - 1) + K_0 b y x \tan \phi \tan^4 \beta \quad (2.15)$$



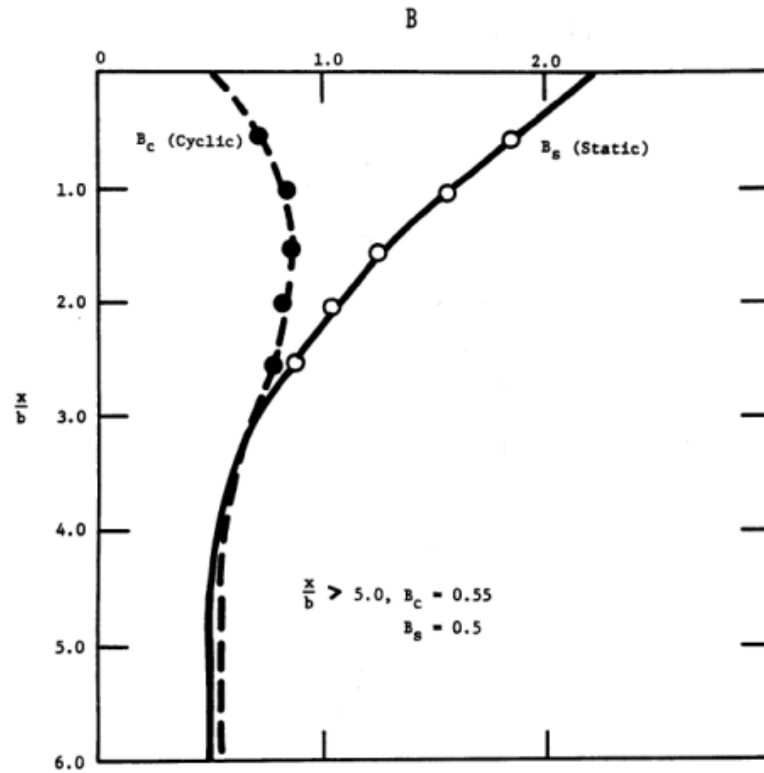
Gambar 2.7 Karakteristik Kurva P-Y untuk Pembebanan Statis dan Siklik

(Sumber: Wang & Reese, 1993)



Gambar 2.8 Nilai Koefisien $\bar{A}_s$ dan $\bar{A}_c$

(Sumber: Wang & Reese, 1993)



Gambar 2.9 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 (2.16). Dengan Nilai A_s dihasilkan dari Gambar 2.7.

$$P_u = \bar{A}_s P_s \text{ atau } P_u = \bar{A}_c P_c \quad (2.16)$$

Untuk menghitung nilai y_m sebagai $b/60$. Nilai P_m dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.17). Dengan nilai A_s dihasilkan dari Gambar 2.7.

$$P_m = B_s P_s \text{ atau } P_m = B_c P_c \quad (2.17)$$

Perhitungan untuk garis lurus awal dari kurva P-Y dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.18).

$$P = (kx)y \quad (2.18)$$

Penetapan bagian parabola dari kurva P-Y dapat menggunakan perhitungan pada persamaan (2.19).

$$P_u = \bar{C} y^{1/n} \quad (2.19)$$

Nilai kemiringan garis antara titik m dan u dapat ditentukan dengan persamaan (2.20).

$$m = \frac{P_u - P_m}{y_u - y_m} \quad (2.20)$$

Kekuatan bagian parabola dengan menghitung menggunakan persamaan (2.21).

$$n = \frac{P_m}{m y_m} \quad (2.21)$$

Mencari nilai koefisien C dengan persamaan (2.22).

$$\bar{C} = \frac{P_m}{y_m^{\frac{1}{n}}} \quad (2.22)$$

Penentuan titik K dengan menggunakan persamaan (2.23).

$$y_k = \left(\frac{\bar{C}}{k_x} \right)^{\left(\frac{n}{n-1} \right)} \quad (2.23)$$

2.8 Pengujian Fondasi Tiang

Pengujian fondasi tiang merupakan salah satu tahap penting dalam pekerjaan konstruksi yang bertujuan untuk memastikan bahwa elemen tiang memiliki daya dukung dan kondisi struktural sesuai dengan perencanaan teknis. Melalui pengujian ini, dapat diketahui kemampuan tiang dalam menahan beban vertikal, lateral, maupun tarik, serta perilaku deformasi yang terjadi akibat pembebanan. Pengujian ini menjadi acuan penting dalam evaluasi kinerja sistem fondasi sebelum pembangunan struktur atas dilakukan (Das, 2021).

Secara umum, tujuan pengujian fondasi tiang adalah untuk menentukan kapasitas daya dukung aktual tiang, serta memverifikasi hasil analisis dari data penyelidikan tanah. Pengujian juga digunakan untuk menilai penurunan (*settlement*) yang terjadi saat beban diterapkan dan memastikan fondasi bekerja secara aman di bawah kondisi kerja aktual (Bowles, 1997).

2.8.1 Uji Beban Statis (*Static Load Test*)

Uji beban statis merupakan metode paling akurat dalam menentukan daya dukung tiang di lapangan. Pembebanan dilakukan secara bertahap menggunakan sistem reaksi beban hingga mencapai beban maksimum yang direncanakan, kemudian diukur penurunan tiang yang terjadi. Hubungan antara beban dan penurunan digunakan untuk menentukan kapasitas ultimit dan perilaku elastis tiang (Tomlinson & Woodward, 2008).

Menurut Hardjasaputra H. (2006), salah satu cara untuk mengevaluasi daya dukung pondasi tiang dengan menggunakan metode uji beban statik yaitu pembebanan langsung tiang pondasi dengan besar beban 200% atau 300% daya dukung ijin tiang. Uji beban sebesar 200% lebih ditujukan untuk 'pembuktian' saat konstruksi, sedangkan uji beban sebesar 300% ditujukan untuk mencari daya dukung batas tiang, untuk keperluan perencanaan pondasi. Data penting dari pengujian ini adalah diperolehnya grafik hubungan antara penurunan (*settlement*) vs beban (*load*).

2.8.1.1 Interpretasi Pengujian Aksial *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 berikut.

$$\Delta = \frac{QL}{AE} \quad (2.24)$$

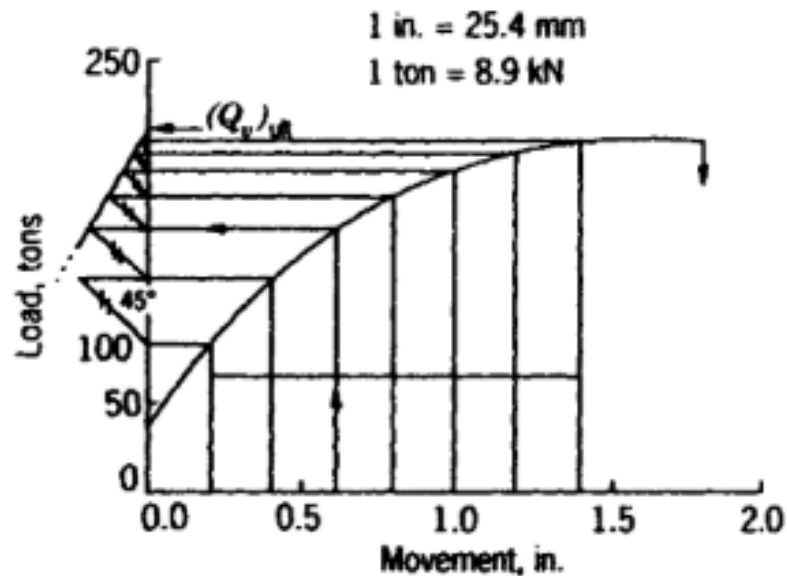
Dimana:

Q = Beban yang digunakan

L = Panjang Tiang Pancang

A = Luas Penampang Tiang

E = Modulus Elastisitas Tiang



Gambar 2.11 Grafik Interpretasi Beban-Penurunan Metode Mazurkiewicz

(Sumber: Prakash, 2008)

2.8.1.3 Interpretasi Pengujian Aksial *Static Loading Test* (SLT) Metode Chin

Berdasarkan asumsi bahwa hanya deformasi geser yang terjadi dan grafik beban-penurunan berbentuk hiperbola, maka grafik Δ/Q 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 (2.26).
2. Beban ultimit dapat ditentukan dengan Persamaan (2.27).
3. Grafik beban-penurunan mendekati hiperbolis seperti pada Gambar 2.12.

$$\Delta/Q \quad (2.26)$$

$$Q_{ult} = \frac{1}{c_1} \quad (2.27)$$

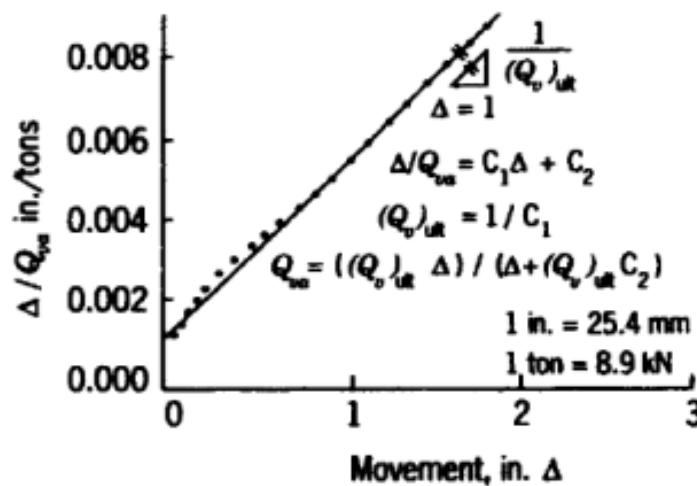
Dimana:

Q_{ult} = Daya dukung ultimit

Q = Beban

Δ = Penurunan

C_1 = Konstanta regresi dari persamaan linear



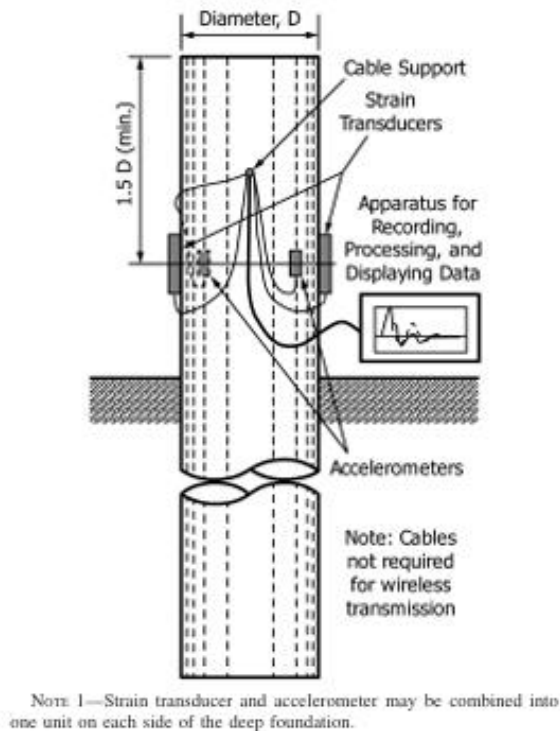
Gambar 2.12 Grafik Interpretasi Beban-Penurunan Metode Chin
(Sumber: Prakash, 2008)

2.8.2 Uji *Pile Driving Analyzer* (PDA)

Menurut Didik Haryadi (2023). Uji PDA merupakan suatu metode pengujian secara dinamik untuk mengukur kapasitas ultimate aksial tekan tiang, penurunan akhir, keutuhan tiang, dan energi yang berasal dari tumbukan hammer yang dilakukan pada pondasi dalam.

Pengujian *Pile Driving Analyzer* dilaksanakan dengan meletakkan 2 pasang sensor yang berlawanan. Adapun 2 pasang sensor tersebut yaitu satu pasang sensor yang terdiri dari pengukur regangan dan pengukur percepatan yang dipasang dibawah kepala tiang. Sensor tersebut akan merekam gerakan yang timbul dan mengubah menjadi sinyal listrik lalu hasilnya akan langsung terekam dan diproses dengan *Pile Driving Analyzer* (PDA) model PAX.

Hasil pengujian PDA pada tiang akan menghasilkan grafik. Grafik tersebut akan dianalisis lebih lanjut dengan program CAPWAP (*Case Pile Wave Analysis Program*) yang merupakan sebuah aplikasi analisa numerik untuk memprediksi besaran dan distribusi gaya perlawanan tanah sepanjang tiang fondasi (Prasetya & Hadi, 2023). CAPWAP juga menyajikan korelasi data pembebanan dengan penurunan yang terjadi dalam bentuk grafik, dari pembacaan grafik tersebut diperoleh nilai daya dukung (R_u), gaya ujung (R_b), gaya gesek (R_s), dan penurunan (DMX).



Gambar 2.13 Pengujian *Pile Driving Analyzer*

(Sumber: ASTM D4945-12)

Adapun untuk prosedur pengujian aksial tiang menurut SNI 8459:2017 dan ASTM D4945-12 dilakukan sebagai berikut:

1. Persiapan Tiang Uji, Alat, dan Instrumen

Pastikan lokasi dan tiang pancang siap untuk pengujian. Sensor gaya dan akselometer harus dipasang secara simetris di kedua sisi tiang pada lokasi yang sesuai di atas permukaan tanah.

2. Pengecekan dan Kalibrasi Alat

Seluruh instrumen pengukuran wajib melalui proses kalibrasi sesuai prosedur standar. Pengujian hanya diperbolehkan dilakukan apabila sistem akuisisi data telah dipastikan akurasinya.

3. Pemasangan Palu (*Drop Hammer* atau Palu Diesel)

Pembebanan dinamis diberikan melalui penjatuhan massa berat (palu), umumnya dengan bobot minimal 1% hingga 2% dari kapasitas daya dukung tiang yang ditargetkan. Palu dijatuhkan pada kepala tiang melalui bantalan lunak (*cushion*) untuk mencegah kerusakan struktur tiang. Jumlah pukulan per menit dari palu harus dicatat.

4. Pengambilan dan Rekaman Data

Gaya tumbukan dan percepatan direkam selama proses penumbukan berlangsung. Selanjutnya, perangkat lunak khusus digunakan untuk mengolah sinyal tersebut menjadi data kecepatan dan gaya.

5. Analisis Data Awal

Data hasil pengujian dianalisis langsung di lokasi menggunakan pendekatan seperti metode Case untuk memperoleh perkiraan awal kapasitas daya dukung tiang.

6. Analisis Lanjutan

Analisis lebih mendetail dapat dilakukan menggunakan *signal matching analysis* (CAPWAP) untuk menghasilkan kapasitas tiang dan respons tanah yang lebih akurat.

Kekuatan dan modulus elastisitas dinamik untuk fondasi tiang dapat bervariasi karena tergantung pada kualitas dan usia dari beton, sehingga perlu ketelitian untuk memilih lokasi sensor gaya pada tiang.

2.9 Kelompok Tiang

Secara umum, tiang pancang dipasang secara berkelompok untuk menyalurkan beban structural ke tanah. Kelompok tiang merupakan kumpulan dari beberapa tiang yang diikat dalam satu *pile cap* untuk menahan beban di joint tertentu, dan membantu untuk menahan suatu beban (Das, 2021). *Pile cap* berfungsi menyatukan kepala-kepala tiang menjadi satu sistem yang kaku.

2.9.1 Kebutuhan Jumlah Tiang

Kebutuhan tiang ditentukan berdasarkan daya dukung aksial (Tarik tekan), dan daya dukung lateral. Sebelum diketahui reaksi perletakan setiap titik kolom tinjauan harus ditentukan konfigurasi kelompok tiang, dan menghitung efisiensi kelompok tiang. Berikut arah sumbu pada setiap titik kolom fondasi.

1. Jumlah Tiang Berdasarkan Daya Dukung Aksial

Menentukan jumlah tiang berdasarkan daya dukung aksial digunakan persamaan berikut:

$$n = \frac{Px}{Q_{all}} \quad (2.28)$$

Keterangan:

N = Jumlah tiang yang dibutuhkan dalam satu titik kolom tinjauan

P_x = Beban pada sumbu x (kN)

Q_{all} = Daya dukung izin tiang kondisi statik, gempa rencana dan gempa kuat

2. Jumlah Tiang Berdasarkan Daya Dukung Lateral

Menentukan jumlah tiang berdasarkan daya dukung aksial digunakan persamaan berikut:

$$n = \frac{P}{Q_g} \quad (2.29)$$

Keterangan:

N = Jumlah tiang yang dibutuhkan dalam satu titik kolom tinjauan

P = Beban absolute terbesar diantara sumbu y dan z (kN)

Q_g = Jumlah tiang yang dibutuhkan dalam satu titik kolom tinjauan

2.9.2 Konfigurasi Tiang

Hasil dari jumlah kebutuhan tiang lalu dibuatkan konfigurasi tiang berdasarkan jumlah tiang yang didapat. Konfigurasi tiang merupakan pengaturan dan tata letak tiang pancang atau fondasi bor yang digunakan untuk mendukung struktur bangunan. Perencanaan konfigurasi tiang pancang bertujuan untuk mengurangi penurunan, defleksi tiang pancang dan efisiensi penggunaan jumlah tiang pancang (Tamara & Fahriani, 2017).

Konfigurasi tiang didapat setelah mengetahui jarak antar tiang. Apabila jarak tiang (S) yang semakin rapat maka ukuran *pile cap* yang dibutuhkan akan semakin kecil. Tetapi bila memikul beban momen maka jarak tiang perlu diperbesar untuk menambah tahanan momen. Pada umumnya jarak antara dua tiang dalam kelompok diisyaratkan minimum 0,6 meter dan maksimum 2 meter.

$S = 2,5$ sampai $3D$

Dimana:

S = Jarak antar as tiang (m)

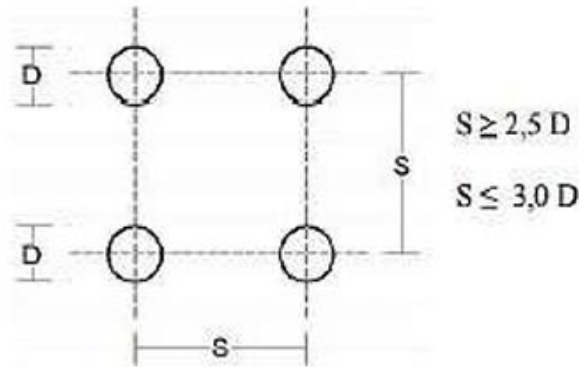
D = Diameter tiang (m)

Dalam mempertimbangkan jarak tiang fondasi pada kelompok tiang, ada beberapa ketentuan yang harus diperhatikan antara lain:

- a. Bila jarak antar tiang $< 2,5D$ kemungkinan tanah di sekitar kelompok tiang akan naik terlalu berlebihan karena terdesak oleh tiang-tiang yang dipasang

terlalu berdekatan. Selain itu juga dapat menyebabkan tiang-tiang yang telah terpasang disekitarnya akan terangkat.

- b. Bila Jarak antar tiang $> 3D$ akan menyebabkan perencanaan menjadi tidak ekonomis karena akan memperbesar ukuran atau dimensi.



Gambar 2.14 Jarak Antar Tiang

(Sumber: Sardjono, 1998)

2.10 Efisiensi Tiang

Efisiensi tiang (E_g) adalah nilai pengali terhadap kapasitas dukung ultimit tiang tunggal dengan memperhatikan pengaruh kelompok tiang (Hardiyatmo, 2015). Efisiensi kelompok tiang pada fondasi dalam adalah ukuran seberapa efektif sekelompok tiang bekerja bersama-sama untuk mendukung beban struktur dibandingkan dengan jika tiang-tiang tersebut bekerja secara individu. Efisiensi ini penting karena dalam banyak kasus, tiang fondasi digunakan dalam kelompok untuk meningkatkan kapasitas daya dukung dan stabilitas. Berikut persamaan dalam perhitungan efisiensi tiang:

$$E_g = 1 - \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90mn} \times \theta \quad (2.30)$$

Dimana:

E_g = Efisiensi tiang

θ = Arc tan d/s

m = Jumlah tiang searah sumbu x

n = Jumlah tiang searah sumbu y