

BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Jembatan adalah suatu konstruksi yang gunanya untuk meneruskan jalan melalui rintangan yang berada lebih rendah. Rintangan ini biasanya jalan lain berupa jalan air atau jalan lalu lintas biasa (Struyk dan Veen, 1984). Jembatan sendiri merupakan suatu sebuah struktur yang sengaja dibangun untuk menyeberangi jurang atau rintangan seperti sungai, lembah, rel kereta api maupun jalan raya. Jembatan dibangun agar para pejalan kaki, pengemudi kendaraan atau kereta api dapat melintasi halangan-halangan tersebut. Pembangunan jembatan ini sendiri butuh perencanaan pada bidang konstruksi. Desain dari jembatan bervariasi tergantung pada fungsi dari jembatan atau kondisi bentuk permukaan bumi dimana jembatan tersebut dibangun.

Dari segi strukturnya Jembatan merupakan sebuah struktur yang memiliki dua komponen utama yang sering disebut struktur atas dan struktur bawah. Struktur atas pada sebuah jembatan antara lain diantaranya yaitu lantai kendaraan (*deck*), gelagar jembatan (*girder*), pengaku jembatan, perletakan jembatan (*bearing*), dan *expansion joint*, kemudian untuk struktur bawah jembatan meliputi *abutment*, plat injak, pilar jembatan, *pile cap*, dan pondasi jembatan. Perencanaan struktur jembatan harus menghasilkan struktur yang memenuhi pokok-pokok perencanaan sebagai berikut (Menteri PUPR, 2022) :

1. Kekuatan dan stabilitas struktur (*structural safety*),

2. Keawetan dan kelayakan jangka panjang (*durability*),
3. Kemudahan pemeriksaan (*inspectability*),
4. Kemudahan pemeliharaan (*maintainability*),
5. Kenyamanan bagi pengguna jembatan (*rideability*),
6. Ekonomis,
7. Kemudahan pelaksanaan (*constructability*),
8. Estetika,
9. Dampak lingkungan pada tingkat yang wajar dan cenderung minimal.

2.2 Penyelidikan Tanah

Penyelidikan tanah merupakan metode untuk mengetahui karakteristik dan daya dukung tanah yang akan digunakan sebagai dasar dari sebuah bangunan konstruksi. Penyelidikan tanah harus dilakukan sebelum menentukan jenis pondasi apa yang akan digunakan. Penyelidikan tanah memiliki beberapa tujuan sebagai berikut (Chairullah, 2016) :

1. Mengetahui kedalaman tanah keras di lokasi sehingga dapat menentukan perletakan pondasi yang tepat dan sesuai,
2. Mengetahui kedalaman muka air tanah,
3. Mengetahui karakteristik tanah pada setiap lapisan,
4. Menentukan kapasitas daya dukung tanah,
5. Mengetahui *sample* tanah yang kemudian akan diuji di laboratorium, dan
6. Menentukan tipe pondasi yang akan digunakan.

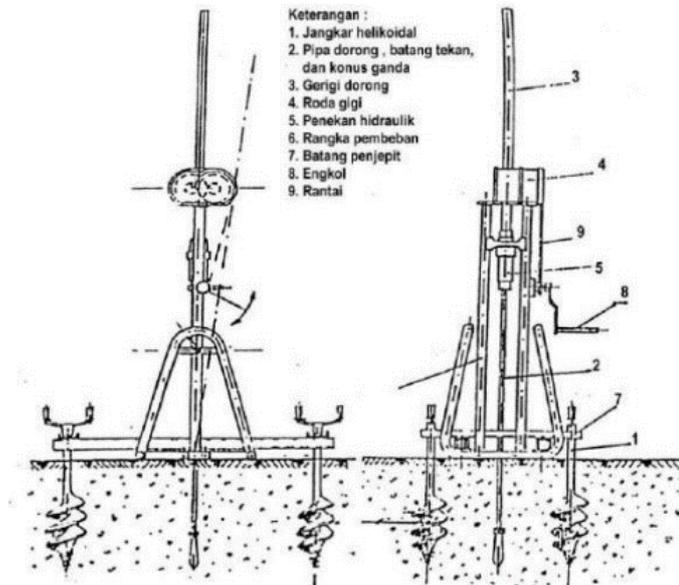
Penyelidikan tanah biasanya terdiri dari 3 tahapan, yaitu pengeboran, pengambilan *sample* tanah, kemudian pengujian *sample* tanah di laboratorium. Penyelidikan tanah yang dilakukan di lapangan (*in-situ field test*) yang biasa dilakukan di Indonesia adalah uji sondir atau *cone penetration test* (CPT) dan uji *standart penetration test* (SPT).

2.2.1 Cone Penetration Test (CPT)

Cone Penetration Test (CPT) atau yang biasa disebut dengan uji Sondir bertujuan untuk mengetahui kapasitas dukung pada tanah yang akan di uji. Uji sondir dilakukan langsung di lapangan dengan menggunakan alat sondir yang mengukur nilai perlawanan konus (*cone resistance*) dan hambatan lekat (*local friction*). Konus dimasukkan ke dalam tanah dengan cara ditekan kemudian dilakukan pembacaan di manometer pada kedalaman setiap 20 cm.

Hasil dari penyelidikan sondir berupa diagram yang menampilkan hubungan antara kedalaman sondir dengan besar nilai perlawanan dari konus (qc) serta jumlah hambatan pelekak (TF).

Gambar alat Uji CPT atau Sondir dapat dilihat pada Gambar 2.1 di bawah ini.

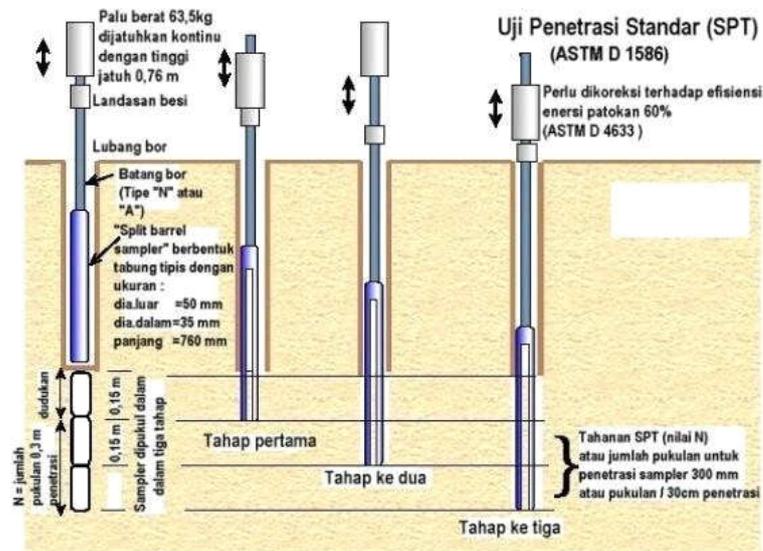


Gambar 2. 1 Alat Uji CPT

(Sumber : Sanglerat G. – *The Penetrometer and Soil Exploration*)

2.2.2 Standart Penetration Test (SPT)

Pengujian SPT (*Standart Penetration Test*) digunakan untuk memperoleh data jenis dan kekuatan tanah dari suatu lapisan tanah. Uji SPT dilaksanakan pada lubang bor setelah pengambilan sampel tanah pada setiap beberapa interval kedalaman. Prinsip pelaksanaan uji SPT adalah dengan memukul tabung ke dalam lubang bor sedalam 450 mm menggunakan palu dengan berat 63,5 kg dari ketinggian 760 mm. Parameter yang didapat dari pengujian ini adalah jumlah pukulan untuk melakukan penetrasi sedalam 150 mm. Urutan pengujian SPT dapat dilihat pada Gambar 2.2 di bawah ini.



Gambar 2. 2 Pengujian SPT
(Sumber : SNI 4153-2008)

2.3 Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah bertujuan untuk mengelompokkan beberapa jenis tanah yang memiliki sifat – sifat indeks sejenis ke dalam kelompok ataupun subkelompok. Sifat – sifat ini dapat berupa ukuran, bentuk, dan bahan penyusunnya. Klasifikasi tanah diharapkan dapat mempermudah dalam pemakaian dan pemanfaatan tanah tersebut karena dengan diketahuinya perilaku tanah tersebut akan mempermudah dalam tahapan awal desain dari suatu bangunan konstruksi.

Sistem klasifikasi tanah yang digunakan dalam dunia konstruksi terbagi dalam beberapa jenis. Sistem klasifikasi tanah yang sering digunakan dalam perencanaan bangunan konstruksi, yaitu sistem klasifikasi tanah USCS (*Unified Soil Classification System*). Sistem klasifikasi USCS atau yang biasa dikenal dengan sistem *Unified* diperkenalkan oleh Casagrande pada tahun 1942. Sistem ini membagi tanah dalam dua kelompok yaitu tanah berbutir kasar dan tanah berbutir

halus. Tanah berbutir kasar yaitu tanah kerikil dan pasir yang < 50% berat totalnya lolos saringan No. 200. Sedangkan tanah berbutir halus yaitu tanah yang > 50% berat totalnya lolos saringan No. 200. Dalam sistem ini setiap tanah diberikan simbol berupa dua huruf yang menunjukkan jenis dan sifatnya.

Huruf pertama menunjukkan jenisnya, seperti

G = Kerikil (*gravel*)

S = Pasir (*sand*)

M = Lanau (*silt*)

C = Lempung (*clay*)

O = Tanah organik

Huruf kedua menunjukkan sifatnya, seperti

W = Bergradasi baik (*well graded*)

P = Bergradasi jelek (*poorly graded*)

M = Mengandung lanau

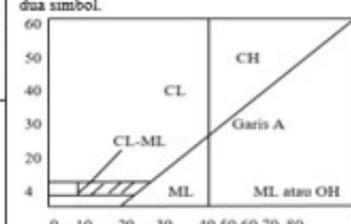
C = Mengandung lempung

L = Bersifat plastis rendah (*low plasticity*)

H = Bersifat plastis tinggi (*high plasticity*)

Sistem klasifikasi tanah berdasarkan USCS (*Unified Soil Classification System*) dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Sistem Klasifikasi Unified

Divisi Utama		Simbol	Nama Umum	Kriteria Klasifikasi		
Tanah berbutir kasar; 50% butiran tertahan saringan No. 200	Kerikil 50% fraksi kasar tertahan saringan No. 4	GW	Kerikil bergradasi-baik dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW		
		GP	Kerikil bergradasi-buruk dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus			
		GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau	Batas-batas <i>Aterberg</i> di bawah garis A atau $PI < 4$ Bila batas <i>Aterberg</i> berada didaerah arsir dari diagram		
		GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung	Batas-batas <i>Aterberg</i> di bawah garis A atau $PI > 7$ Bila batas <i>Aterberg</i> berada didaerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol		
	Pasir; 50% fraksi kasar lolos saringan No. 4	Pasir bersih (hanya pasir)	SW	Pasir bergradasi-baik, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW	
			SP	Pasir bergradasi-buruk, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus		
		Pasir dengan butiran halus	SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau	Batas-batas <i>Aterberg</i> di bawah garis A atau $PI < 4$ Bila batas <i>Aterberg</i> berada didaerah arsir dari diagram	
			SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung	Batas-batas <i>Aterberg</i> di bawah garis A atau $PI > 7$ Bila batas <i>Aterberg</i> berada didaerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol	
		Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos ayakan No. 200	Lanau dan lempung batas cair $\leq 50\%$	ML	Lanau anorganik, pasir halus sekali, serbuk batuan, pasir halus berlanau atau berlempung	Diagram Plastisitas: Untuk mengklasifikasi kadar butiran halus yang terkandung dalam tanah berbutir halus dan kasar. Batas <i>Aterberg</i> yang termasuk dalam daerah yang di arsir berarti batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol.  Batas Cair LL (%) Garis A : $PI = 0.73 (LL - 20)$
				CL	Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai dengan sedang lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung "kurus" (<i>lean clay</i>)	
OL	Lanau-organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah					
Lanau dan lempung batas cair $\geq 50\%$	MH	Lanau anorganik atau pasir halus diatomae, atau lanau diatomae, lanau yang elastis				
	CH	Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung "gemuk" (<i>fat clay</i>)				
	OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi.				
Tanah-tanah dengan kandungan organik sangat tinggi	PT	<i>Peat</i> (gambut), <i>muck</i> , dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi				

Sumber : Mekanika Tanah II, Tim Dosen Teknik Sipil Undip

2.4 Pondasi

Pondasi merupakan struktur bagian bawah bangunan yang berhubungan langsung dengan tanah, atau bagian bangunan yang terletak di bawah permukaan tanah yang mempunyai fungsi memikul beban bagian bangunan lain di atasnya (Bowles, 1997). Pondasi juga disebut struktur bangunan bagian bawah (*sub structure*), terletak paling bawah dari bangunan yang berfungsi untuk mendukung dan menompang seluruh beban bangunan dan meneruskan beban maupun gaya tersebut ke tanah yang berada di bawahnya. Untuk tujuan memenuhi aspek tersebut pondasi bangunan harus direncanakan dan diperhitungkan untuk dapat menjamin kestabilan bangunan terhadap berat sendiri, beban – beban berguna dan gaya – gaya luar, seperti tekanan angin, gempa bumi dan lain – lain, dan tidak boleh terjadi penurunan pondasi setempat ataupun penurunan pondasi yang merata lebih dari batas tertentu.

Ditinjau dari segi fungsinya sebagai pendukung bangunan dan mencegah kerusakan struktur tanah di bawahnya, suatu perencanaan pondasi dikatakan benar apabila beban yang diteruskan oleh pondasi ke tanah tidak lebih melampaui kekuatan tanah yang bersangkutan. Apabila kekuatan tanah dilampaui, maka akan terjadi penurunan yang berlebihan atau keruntuhan dari tanah secara signifikan. Jika tegangan tekan melebihi tekanan yang diizinkan, maka dapat menggunakan bantuan pondasi tiang untuk membantu memikul tegangan tekan pada dinding dan kolom pada struktur bangunan. Oleh sebab itu, dalam perencanaan pondasi sebaiknya mengikuti rekomendasi dari hasil penyelidikan tanah (*soil investigation*), yaitu suatu usaha penyelidikan ke dalam lapisan tanah untuk mengetahui jenis dan

kekuatan tanah. Untuk dapat melakukan analisis geoteknik (mekanika tanah dan teknik pondasi) yang baik dan benar, sangat diperlukan data – data tanah (*soil test*) bawah permukaan yang lengkap dan akurat. Data – data ada yang dapat diperoleh langsung dari survei *geoteknik* lapangan dan ada yang diperoleh langsung dari uji laboratorium terhadap contoh tanah yang diambil dari bawah permukaan melalui boring. Penyelidikan tanah di lapangan lainnya dapat berupa pengujian CPT (*Cone Penetration Test*) dan pengujian SPT (*Standard Penetration Test*).

Dari segi kedalamannya jenis pondasi dibedakan menjadi dua yaitu pondasi dangkal dan pondasi dalam dimana pondasi dangkal biasanya memiliki kedalaman maksimum 3 meter. Pondasi dangkal dapat digunakan untuk bangunan yang tidak terlalu tinggi atau bangunan dengan dua lantai serta mempunyai keadaan tanah yang cenderung keras untuk menahan beban bangunan yang akan ditopangnya. Selain itu penggunaan pondasi dangkal juga dipengaruhi dengan keadaan struktur tanah, tanah yang lembek serta tanah yang mempunyai daya dukung yang relatif rendah tidak cocok untuk jenis pondasi dangkal. Pondasi ini memiliki beberapa jenis diantaranya pondasi tapak (*pad foundation*), pondasi memanjang (*strip foundations*), pondasi tikari (*raft foundations*), pondasi rakit, pondasi sumuran (*cyclop*), pondasi plat beton lajur, dan pondasi umpak. Pondasi dangkal, digunakan bila lapisan tanah pendukung yang keras terletak pada kedalaman maksimum 12 meter di bawah pondasi. Beberapa jenis pondasi dangkal adalah sebagai berikut :

1. Pondasi langsung, bila kedalaman tanah keras < 5 m,
2. Pondasi sumuran, bila kedalaman tanah keras antara 5-12 m.

Selanjutnya adalah pondasi dalam, pondasi dalam dibangun dengan kedalaman yang di tentukan dimana daya dukung pondasi tersebut dipengaruhi oleh jenis tanah yang berada dibawah. Pelaksanaan pondasi dalam dilakukan sampai kedalaman tanah keras. Beberapa contoh pondasi dalam yang bisa kita jumpai yaitu pondasi *bored pile (caisson)*, pondasi tiang pancang dan pondasi *piers*. Pondasi dalam sangat berguna untuk membangun bangunan yang terdiri dari tiga lantai ke atas, dengan kedalaman yang bisa mencapai 60 meter maka pondasi ini bisa mendukung beban yang besar. Tiang-tiang pondasi ini akan disatukan oleh *pile cap* dimana satu *pile cap* bisa terdiri dari beberapa tiang pondasi. Adapun jenis jenisnya diantaranya tiang pancang kayu (*timber pile*), tiang pancang baja (*steel pile*), dan tiang pancang beton (*concrete pile*).

2.5 Daya Dukung

Daya dukung (*bearing capacity*) adalah kemampuan tanah di bawah dan sekitar pondasi untuk menahan beban yang bekerja dari struktur di atasnya. Daya dukung pondasi dalam dan besarnya penurunan pondasi dapat dihitung berdasarkan data tanah dari pengujian laboratorium atau pengujian di lapangan. Pengujian tanah di laboratorium dilakukan untuk memperoleh nilai sifat fisis (*index properties*) dan sifat mekanis (*engineering properties*) tanah. Pengujian di lapangan yang sering dilakukan.

untuk mengetahui besarnya daya dukung tanah adalah pengujian pembebanan (*loading test*). Berdasarkan pengujian pembebanan tersebut, besarnya daya dukung ultimit dan penurunan dapat diperkirakan. Pengujian lapangan lain yang dapat digunakan untuk mencari daya dukung tanah adalah pengujian SPT.

Terdapat beberapa grafik yang dapat digunakan untuk menentukan parameter tanah yang harus dicari melalui pengujian laboratorium. Penelitian ini dilakukan berdasarkan beberapa pengujian di lapangan. Data pengujian lapangan yang digunakan adalah N-SPT dan pembebanan siklik (*cyclic loading test*) pada tiang bor. Data N-SPT akan dikorelasikan dengan sifat fisis dan mekanis tanah. Daya dukung dan penurunan pondasi dalam dapat dihitung dengan metode Meyerhof, Reese dan White.

1. Daya dukung berdasarkan data *Standard Penetration Test* (SPT) Metode Meyerhof Tahanan ujung pondasi tiang

$$Q_p = 9 \times C_u \times A_p \dots\dots\dots(2.1)$$

Tahanan geser selimut tiang

$$Q_s = \alpha \times C_u \times p \times L_i \dots\dots\dots(2.2)$$

keterangan :

$$C_u = \text{Koehesi } \textit{undrained} \text{ (KN/m}^2 \text{)}$$

A = Koefisien adhesi antara tanah dan tiang

$$A_p = \text{Luas penampang tiang (m}^2 \text{)}$$

P = Keliling tiang (m)

L_i = Tebal lapisan tanah (m)

2. Daya dukung berdasarkan data *Cone Penetration Test* (CPT) Metode Meyerhof

Tahanan ujung pondasi tiang :

$$Q_p = Q_c \times A_p \dots\dots\dots(2.3)$$

Tahanan geser selimut tiang :

$$Q_s = JHP \times K \dots\dots\dots(2.4)$$

keterangan :

Q_c = Tahanan konus pada ujung tiang (kg/cm^2)

A_p = Luas penampang tiang (cm^2)

JHP = Jumlah hambatan pelekak (kg/cm)

K = Keliling tiang (cm)

2.5.1 Kapasitas Daya Dukung Tiang

Kapasitas tiang (*pile capacity*) adalah kapasitas dukung tiang dalam mendukung beban (Hardiyatmo, 2010). Tanah yang mengalami pembebanan seperti beban pondasi, maka akan mengalami distorsi dan penurunan. Apabila beban tersebut ditambah maka penurunan juga akan bertambah. Akhirnya akan terjadi kondisi di mana pada beban tetap, pondasi akan mengalami penurunan yang sangat besar. Hal ini menunjukkan bahwa keruntuhan kapasitas dukung telah terjadi. Berdasarkan hal tersebut maka perhitungan kapasitas dukung pada pondasi sangatlah penting agar beban pondasi tidak menimbulkan tekanan yang berlebihan pada tanah di bawahnya. Perhitungan kapasitas dukung pondasi tiang pancang dibedakan menjadi dua berdasarkan jumlah tiangnya, yaitu kapasitas dukung tiang tunggal dan kapasitas dukung kelompok tiang.

2.5.2 Kapasitas Dukung Tiang Tunggal

Ada beberapa metode yang digunakan dalam perhitungan kapasitas dukung tiang tunggal salah satunya dengan metode statis. Hitungan kapasitas secara statis dilakukan menurut teori yaitu dengan mempelajari sifat – sifat teknis tanah. Data ini didapatkan dari hasil uji lapangan (CPT, SPT). Perhitungan kapasitas dukung tiang dengan metode statis dibedakan berdasarkan jenis tanahnya. Pada penelitian ini, didapat jenis tanah pada dasar

pondasi merupakan jenis tanah berpasir. Berikut adalah perhitungan kapasitas daya dukung tiang tunggal pada tanah pasir berdasarkan metode statis.

2.5.2.1 Kapasitas Dukung Ultimit Berdasarkan Data Uji *Standart Penetration Test* (SPT)

Kapasitas ultimit tiang dapat dihitung berdasarkan nilai N hasil uji SPT di lapangan. Menurut Meyerhof (1976) perhitungan kapasitas ultimit berdasarkan data uji SPT terbagi menjadi dua yaitu persamaan untuk tanah kohesif dan tanah non kohesif. Karena jenis tanah yang ada di lapangan berjenis tanah pasir, maka persamaan yang digunakan adalah persamaan untuk tanah non kohesif.

a. Tahanan Ujung (Q_p)

Nilai tahanan ujung untuk tanah non kohesif dapat dilihat pada Persamaan 2.5.

$$Q_p = 40 \cdot Nb \cdot A \dots\dots\dots(2.5)$$

Kemudian pada penelitian selanjutnya Meyerhof (1976) mengusulkan Persamaan 2.6 sebagai berikut.

$$Q_p = 40 \cdot Nb \frac{Lb}{D} \cdot Ap \leq 400 \cdot Nb \cdot (Ap) \dots\dots\dots(2.6)$$

keterangan :

Q_p = Kapasitas dukung ujung tiang

Nb = Nilai N-SPT rata-rata pada elevasi dasar tiang pancang $\left(\frac{N_1+N_2}{2}\right)$

N_1 = Nilai SPT pada kedalaman 4D pada ujung tiang ke bawah

N_2 = Nilai SPT pada kedalaman 8D pada ujung tiang ke atas

AP = Luas penampang dasar tiang pancang

Lb = Kedalaman penetrasi tiang

D = Diameter tiang

b. *Tahanan Gesek (Q_s)*

Nilai tahanan gesek tiang pancang pada tanah nonkohesif dapat dilihat pada Persamaan 2.7 dan Persamaan 2.8.

$$Q_s = 0,2 \cdot NSPT \cdot A_s \dots\dots\dots(2.7)$$

$$Q_s = q_s \cdot A_s \dots\dots\dots(2.8)$$

keterangan :

Q_s = Tahanan gesek satuan. Nilai 0,2 sebagai angka koefisien perlawanan gesek pada tanah lempung kepasiran (Meyerhof)

N-SPT = Nilai rata – rata SPT sepanjang tiang

A_s = Luas selimut tiang pancang

c. *Kapasitas Ultimit Tiang Tunggal (Q_u)*

Untuk menentukan nilai kapasitas ultimit tiang tunggal berdasarkan hasil uji SPT dengan menggunakan Persamaan 2.9 dan Persamaan 2.10.

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s \dots\dots\dots(2.9)$$

$$Q_{all} = \frac{Q_{ult}}{SF} \dots\dots\dots(2.10)$$

keterangan :

Q_p = Tahanan ujung (*end bearing*)

Q_s = Tahanan gesek (*friction resistance*)

Q_{ult} = Kapasitas dukung ultimit tiang

Q_{all} = Kapasitas dukung ultimit tiang yang diizinkan

SF = Angka keamanan

Tabel 2. 2 Faktor-faktor Kapasitas Dukung Meyerhof, Hansen, dan Vesic

ϕ	N_c	N_q	N_γ	ϕ	N_c	N_q	N_γ	ϕ	N_c	N_q	N_γ
0	5.14	1.00	0.00	17	12.34	4.77	1.66	34	42.16	29.44	31.15
1	5.38	1.09	0.002	18	13.10	5.26	2.00	35	46.12	33.30	37.15
2	5.63	1.20	0.01	19	13.93	5.80	2.40	36	50.59	37.75	44.43
3	5.90	1.31	0.02	20	14.83	6.40	2.87	37	55.63	42.92	53.27
4	6.19	1.43	0.04	21	15.82	7.07	3.42	38	61.35	48.93	64.07
5	6.49	1.57	0.07	22	16.88	7.82	4.07	39	67.87	55.96	77.33
6	6.81	1.72	0.11	23	18.05	8.66	4.82	40	75.31	64.20	93.69
7	7.16	1.88	0.15	24	19.32	9.60	5.72	41	83.86	73.90	113.99
8	7.53	2.06	0.21	25	20.72	10.66	6.77	42	93.71	85.38	139.32
9	7.92	2.25	0.28	26	22.25	11.85	8.00	43	105.11	99.02	171.14
10	8.35	2.47	0.37	27	23.94	13.20	9.46	44	118.37	115.31	211.41
11	8.80	2.71	0.47	28	25.80	14.72	11.19	45	133.88	134.88	262.74
12	9.28	2.97	0.60	29	27.86	16.44	13.24	46	152.10	158.51	328.73
13	9.81	3.26	0.74	30	30.14	18.40	15.67	47	173.64	187.21	414.32
14	10.37	3.59	0.92	31	32.67	20.63	18.56	48	199.26	222.31	526.44
15	10.98	3.94	1.13	32	35.49	23.18	22.02	49	229.93	265.51	674.91
16	11.63	4.34	1.38	33	38.64	26.09	26.17	50	266.89	319.07	873.84

Sumber : Mekanika Tanah II,

2.5.3 Kapasitas Dukung Tiang Kelompok

Pondasi tiang pancang biasanya dipasang secara berkelompok. Hal ini dikarenakan tiang pancang tersebut dipasang berdekatan kemudian diikat dengan menggunakan *pile cap*. Kapasitas kelompok tiang tidak selalu sama dengan kapasitas tiang tunggal yang berada di kelompoknya. Maka diperlukan perhitungan untuk mengetahui kapasitas dukung tiang kelompok. Ada beberapa faktor yang menentukan besar kapasitas kelompok tiang antara lain adalah jumlah tiang dalam kelompok, jarak antar tiang dan efisiensi kelompok tiang.

1. Jumlah tiang

Penentuan jumlah tiang didasari pada beban yang bekerja pada pondasi dan kapasitas dukung ijin tiang. Rumus yang digunakan dapat dilihat pada Persamaan 2.11.

$$n = \frac{P}{Q_{all}} \dots\dots\dots(2.11)$$

keterangan :

P = Beban yang bekerja

Q_{all} = Kapasitas dukung tiang tunggal yang diizinkan

2. Kapasitas dukung kelompok tiang

Kapasitas ultimit kelompok tiang dengan memperhatikan faktor efisiensi tiang dinyatakan dengan Persamaan 2.12.

$$Q_g = n \cdot Q_{all} \cdot E_g \dots\dots\dots(2.12)$$

keterangan :

Q_g = Beban maksimum kelompok tiang

n = Jumlah tiang dalam kelompok

Q_{all} = Kapasitas dukung yang diizinkan

E_g = Efisiensi kelompok tiang

3. Efisiensi kelompok tiang pancang

Perhitungan efisiensi kelompok tiang berdasarkan rumus Converse – Labbarre dari *Uniform Building Code AASHTO* dapat dilihat pada Persamaan 2.13

$$Eg = 1 - \theta \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90mn} \dots\dots\dots(2.13)$$

keterangan:

Eg = Efisiensi kelompok tiang

θ = arc tg (D/s)

D = Ukuran penampang tiang

S = Jarak antar tiang (as ke as)

m = Jumlah tiang dalam 1 kolom

n = Jumlah tiang dalam 1 baris

Pada pondasi tiang pancang baik pada tahanan gesek maupun tahanan ujung dengan nilai $S \geq 3D$ maka dapat diambil nilai efisiensi sebesar ($Eg = 1$) (Hardiyatmo, 2010).

2.5.4 Penurunan Pondasi Tiang Pancang

Pada saat pondasi tiang dibebani, tiang akan mengalami pemendekan dan tanah disekitarnya akan mengalami penurunan (Hardiyatmo, 2010). Beberapa sebab terjadinya penurunan akibat pembebanan yang bekerja di atas tanah antara lain :

1. kegagalan atau keruntuhan geser akibat terlampauinya kapasitas dukung tanah,
2. kerusakan atau terjadinya defleksi yang besar pada pondasi,
3. distorsi geser (shear distortion) dari tanah pendukungnya, dan
4. turunnya tanah akibat perubahan angka pori.

Berdasarkan hal – hal tersebut, maka perlu dilakukan pencegahan terhadap penurunan pondasi yang berlebihan dengan melakukan perhitungan penurunan pondasi agar tidak terjadi kegagalan struktur bangunan.

2.5.5 Penurunan Pondasi Tiang Tunggal

2.5.5.1 Penurunan Pondasi Tiang Tunggal Berdasarkan Metode Empiris

Penurunan pondasi tiang tunggal pada tanah pasir dapat dihitung dengan 2 metode yaitu metode empiris dan metode semi-empiris. Perhitungan penurunan pondasi tiang tunggal berdasarkan metode empiris dapat dilihat pada Persamaan 2.14.

$$S = \frac{d}{100} + \frac{q.L}{Ap.Ep} \dots\dots\dots (2.14)$$

keterangan :

S = Penurunan total di kepala tiang

D = Diameter tiang

Q = Beban yang bekerja

AP = Luas penampang tiang

L = Panjang tiang

Ep = Modulus elastis tiang

Perhitungan penurunan pondasi tiang tunggal berdasarkan metode semi empiris dapat dilihat pada Persamaan 2.15.

$$S = S_s + S_p + S_{ps} \dots\dots\dots (2.15)$$

keterangan :

S = Penurunan total pondasi tiang tunggal

S_s = Penurunan akibat deformasi axial tiang Tunggal

SP = Penurunan dari ujung tiang

SPS = Penurunan tiang akibat beban yang dialihkan sepanjang tiang

1. Penurunan akibat deformasi aksial tunggal

Perhitungan penurunan akibat *deformasi* aksial pada tiang tunggal dapat dilihat pada Persamaan 2.16.

$$SS = \frac{(Q_p + \alpha \cdot Q_s)L}{AP \cdot EP} \cdot \frac{Q_{ult}}{SF} \dots\dots\dots(2.16)$$

keterangan :

Q_p = Beban yang didukung ujung tiang

Q_s = Beban yang didukung selimut tiang

AP = Luas penampang tiang

L = Panjang tiang

EP = Modulus elastis tiang

α = Koefisien yang bergantung pada distribusi gesekan selimut sepanjang pondasi tiang. Vesic (1977) menyarankan harga $\alpha = 0,5$ untuk distribusi yang seragam sepanjang tiang.

2. Penurunan dari ujung tiang

Perhitungan penurunan dari ujung tiang pada tiang tunggal dapat dilihat pada Persamaan 2.17.

$$SS = \frac{CP \times QP}{D \times qP} \cdot \frac{Q_{ult}}{SF} \dots \dots \dots (2.17)$$

keterangan :

CP = Koefisien empiris

QP = Perlawanan dukung ujung tiang

qP = Daya dukung batas ujung tiang

D = Diameter tiang

3. Penurunan tiang akibat beban yang dialihkan sepanjang tiang

Perhitungan penurunan akibat beban yang dialihkan pada tiang tunggal dapat dilihat pada Persamaan 2.18.

$$SP = \left(\frac{Q_{ws}}{p \times L} \right) \cdot \frac{D}{E_s} \cdot (1 - V_s^2) IWS \dots \dots \dots (2.18)$$

keterangan:

$\frac{Q_{ws}}{p \times L}$ = Gesekan rata – rata yang bekerja sepanjang tiang

P = Keliling tiang

L = Panjang tiang

E_s = Modulus elastisitas tanah

D = Diameter tiang

V_s = Poisson's ratio tanah

IWS = Faktor pengaruh : $2 + 0,35 \sqrt{\frac{L}{D}}$

Nilai *Poisson's ratio* dan modulus elastisitas tanah dapat dilihat pada Tabel 2.3 berikut.

Tabel 2. 3 Nilai Poisson's ratio dan modulus elastisitas tanah

Macam Tanah	ν_s
Lempung jenuh	0,4 - 0,5
Lempung tak jenuh	0,1 – 0,3
Lempung berpasir	0,2 – 0,3
Lanau	0,3 – 0,35
Pasir padat	0,2 – 0,4
Pasir padat	0,15
Pasir halus	0,25

Sumber : Mekanika Tanah II, Tim Dosen Teknik Sipil Undip

2.5.6 Penurunan Pondasi Tiang Kelompok

Penurunan pondasi tiang kelompok lebih besar dari penurunan pondasi tiang tunggal. Menurut Vesic (1977) perhitungan penurunan pondasi tiang kelompok dapat dilihat pada Persamaan 2.19.

$$S_g = S \sqrt{\frac{B_g}{D}} \dots\dots\dots (2.19)$$

keterangan :

S_g = Penurunan pondasi kelompok tiang

S = Penurunan pondasi tiang tunggal

B_g = Lebar kelompok tiang

D = Diameter tiang tunggal

2.5.7 Penurunan yang Diizinkan

Menurut Marbun (2009) penurunan yang diizinkan dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor – faktor tersebut antara lain tinggi, jenis, kekakuan, dan fungsi bangunan serta besar dan kecepatan penurunannya. Apabila penurunan

berjalan lambat maka semakin besar kemungkinan suatu struktur untuk menyesuaikan diri terhadap penurunan yang terjadi tanpa adanya kerusakan struktur oleh pengaruh rangkai. Karena penurunan maksimum dapat diprediksi dengan ketepatan yang memadai, umumnya dapat diadakan hubungan antara penurunan diizinkan dengan penurunan maksimum.

Menurut Reese & Wright (1997) perbandingan penurunan yang aman adalah $S_{Total} \leq S_{Izin}$ yang dapat dilihat pada Persamaan 2.20 di bawah ini.

$$S_{izin} = 10\% \cdot D \dots\dots\dots (2.20)$$

keterangan :

D = Diameter tiang (m)

Penurunan izin pada kelompok tiang dapat dilihat pada Persamaan 2.21 berikut ini.

$$S_{izin} = \frac{L}{2 \cdot 50} \dots\dots\dots (2.21)$$

keterangan :

L = Kedalaman tiang (m)