

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Tangki Minyak

Dalam menentukan pondasi pada tangki minyak diperlukan data mengenai macam-macam tangki minyak serta besarnya beban pada tangki minyak.

1. Penggolongan Tangki Minyak (Nurudin, 2011)

Berdasarkan letaknya terdapat 2 jenis tangki minyak yaitu:

- a. *Aboveground tank* yaitu tangki penimbun minyak yang terletak di atas permukaan tanah. Tangki jenis ini dapat berada dalam posisi horizontal (melebar) maupun dalam posisi vertikal (tegak).
- b. *Underground tank* yaitu tangki penimbun minyak yang terletak di bawah permukaan tanah.

Berdasarkan bentuk atap terdapat 3 jenis tangki minyak yaitu:

- a. *Fixed roof tank* dengan 2 jenis bentuk atapnya yaitu *cone roof* dan *dome roof*. *Cone roof* memiliki kelemahan yaitu adanya *vapour space* (ruang uap) di antara permukaan fluida dan atap. Jika *vapour space* berada pada kondisi yang mudah terbakar, maka dapat menimbulkan ledakan. Oleh karena itu *fixed roof tank* dilengkapi dengan semacam ventilasi agar tekanan yang ada di dalam dapat diatur sedemikian rupa sehingga tidak mengalami tekanan yang berlebihan. Jenis tangki ini biasanya digunakan untuk menyimpan minyak tanah, air, dan solar.

Terdapat 2 jenis tipe *cone roof* berdasarkan struktur yang menyangga atap itu sendiri:

- *A supported cone roof* yang mana pelat atap akan didukung oleh *rafter* pada girder dan kolom atau oleh rangka batang dengan atau tanpa kolom.

- *A self supported cone roof* yang mana pelat atap berdiri tanpa penyangga sehingga langsung didukung oleh dinding tangki minyak.

Sedangkan *dome roof* adalah jenis tangki dengan bentuk atap seperti dome. Jenis tangki ini biasanya digunakan untuk menyimpan cairan kimia dalam jumlah besar.

- b. *Floating roof tank*, biasanya digunakan untuk menyimpan minyak mentah dan premium. Keuntungannya yaitu tidak adanya *vapour space* dan mengurangi kehilangan akibat penguapan. *Floating roof tank* terbagi atas *external floating roof* dan *internal floating roof*.

B. Pondasi Tiang

Pondasi tiang digunakan untuk mendukung bangunan bila lapisan tanah kuat terletak sangat dalam. Pondasi tiang juga digunakan untuk mendukung bangunan yang menahan gaya angkat ke atas, terutama pada bangunan-bangunan tingkat tinggi yang dipengaruhi oleh gaya-gaya penggulingan akibat beban angin. Selain itu, tiang-tiang juga digunakan untuk mendukung bangunan dermaga, di mana pada bangunan ini, tiang-tiang dipengaruhi oleh gaya-gaya benturan kapal dan gelombang air (Hardiyatmo, 2010).

Pondasi tiang digunakan untuk beberapa tujuan, antara lain:

1. Untuk meneruskan beban bangunan yang terletak di atas air atau tanah lunak, ke tanah pendukung yang kuat.
2. Untuk meneruskan beban ke tanah yang relatif lunak sampai kedalaman tertentu sehingga pondasi bangunan mampu memberikan dukungan yang cukup untuk mendukung beban tersebut oleh gesekan sisi tiang dengan tanah di sekitarnya.
3. Untuk mengangker bangunan yang dipengaruhi oleh gaya angkat ke atas akibat tekanan hidrostatis atau momen penggulingan.
4. Untuk menahan gaya-gaya horisontal dan gaya yang arahnya miring.
5. Untuk memadatkan tanah pasir, sehingga kapasitas dukung tanah tersebut bertambah.
6. Untuk mendukung pondasi bangunan yang permukaan tanahnya mudah tergerus air.

C. Penggolongan Pondasi Tiang

Penggolongan pondasi diantaranya yaitu:

1. Berdasarkan kedalaman tertanam di dalam tanah (Hardiyatmo, 2010), maka pondasi dibedakan menjadi:

- a. **Pondasi dangkal**

Pondasi dangkal yaitu pondasi yang mendukung bebannya secara langsung seperti pondasi telapak, pondasi memanjang dan pondasi rakit.

b. Pondasi dalam

Pondasi dalam yaitu pondasi yang meneruskan beban bangunan ke tanah keras atau batu yang terletak relatif jauh dari permukaan seperti pondasi sumuran dan pondasi tiang seperti tiang pancang dan tiang bor.

2. Berdasarkan mobilisasi tanah menurut *The British Standard Code of Practice for Foundation* (Hardiyatmo, 2010) pondasi tiang dapat dibagi menjadi 3 kategori sebagai berikut:

a. Tiang Perpindahan Besar (*Large Displacement Pile*)

Tiang perpindahan besar (*large displacement pile*), yaitu tiang pejal atau berlubang dengan ujung tertutup yang dipancang ke dalam tanah sehingga terjadi perpindahan volume tanah yang relatif besar. Termasuk dalam tiang perpindahan besar adalah tiang kayu, tiang beton pejal, tiang beton prategang (pejal atau berlubang), tiang baja bulat (tertutup pada ujungnya).

b. Tiang Perpindahan Kecil (*Small Displacement Pile*)

Tiang perpindahan kecil (*small displacement pile*), adalah sama seperti tiang kategori pertama hanya volume tanah yang dipindahkan saat pemancangan relatif kecil, contohnya tiang berlubang dengan ujung terbuka, tiang beton prategang berlubang dengan ujung terbuka, tiang baja H, tiang baja bulat ujung terbuka, tiang ulir.

c. Tiang Tanpa Perpindahan (*Non Displacement Pile*)

Tiang tanpa perpindahan (*non displacement pile*), terdiri dari tiang yang dipasang di dalam tanah dengan cara menggali atau mengebor tanah. Termasuk dalam tiang tanpa perpindahan adalah tiang bor, yaitu

tiang beton yang pengecorannya langsung di dalam lubang kecil pengeboran tanah (pipa baja diletakkan di dalam lubang dan dicor beton).

Pada saat ini telah banyak digunakan berbagai tipe pondasi. Penggunaan di sesuaikan dengan besarnya beban, kondisi lokasi/lingkungan, dan lapisan tanah. Nama dari tipe-tipe pondasi sangat beragam bergantung pada individu yang mendefinisikannya.

3. Berdasarkan metode pelaksanaannya (Hardiyatmo, 2010) pondasi tiang dibagi menjadi sebagai berikut:

a. **Tiang pancang (*driven pile*)** yaitu tiang dipasang dengan cara membuat bahan berbentuk bulat atau bujur sangkar memanjang yang dicetak lebih dahulu dan kemudian dipancang atau ditekan ke dalam tanah. Kelebihan-kelebihan pondasi tiang pancang yaitu:

1. Pemancangan tiang dapat menambah kepadatan tanah granuler.
2. Prosedur pelaksanaan tidak dipengaruhi oleh air tanah.
3. Bahan tiang dapat diperiksa sebelum pemancangan.

Kekurangan-kekurangan pondasi tiang pancang yaitu:

1. Penggembungan permukaan tanah dan gangguan tanah akibat pemancangan dapat menimbulkan masalah.
2. Kepala tiang kadang-kadang pecah akibat pemancangan.
3. Pemancangan sulit, bila diameter tiang terlalu besar.
4. Pemancangan menimbulkan gangguan suara, getaran dan deformasi tanah yang dapat menimbulkan kerusakan bangunan di sekitarnya.

b. **Tiang bor (*drilled shaft/bored pile*)** yaitu tiang dipasang dengan cara mengebor tanah lebih dulu sampai kedalaman tertentu, kemudian tulangan baja dimasukkan dalam lubang bor dan kemudian diisi/dicor dengan beton.

Pondasi tiang bor (*bored pile*) memiliki kelebihan dan kekurangan bila dibandingkan dengan pondasi tiang pancang. Kelebihan-kelebihan pondasi *bored pile* yaitu:

1. Pemasangan tidak menimbulkan gangguan suara dan getaran yang membahayakan bangunan sekitarnya.
2. Kedalaman tiang dapat divariasikan.
3. Tanah dapat diperiksa dan dicocokkan dengan data laboratorium.
4. Tiang bor dapat dipasang menembus batuan, berbeda dengan tiang pancang yang akan kesulitan menembus lapisan batuan.
5. Diameter tiang memungkinkan dibuat besar, bila perlu ujung bawah tiang dapat dibuat lebih besar guna mempertinggi kapasitas dukungnya.
6. Tidak ada resiko kenaikan muka tanah.
7. Penulangan tidak dipengaruhi oleh tegangan pada waktu pengangkutan dan pemancangan.

Kekurangan-kekurangan pondasi *bored pile* (tiang bor) yaitu:

1. Pengecoran *bored pile* dipengaruhi kondisi cuaca.
2. Pengecoran beton agak sulit bila dipengaruhi air tanah karena mutu beton tidak dapat dikontrol dengan baik.

3. Mutu beton hasil pengecoran bila tidak terjamin keseragamannya di sepanjang badan tiang bor mengurangi kapasitas dukung tiang bor, terutama bila tiang bor cukup dalam.
 4. Pengeboran dapat mengakibatkan gangguan kepadatan, bila tanah berupa pasir atau tanah kerikil.
 5. Air yang mengalir ke dalam lubang bor dapat mengakibatkan gangguan tanah, sehingga mengurangi kapasitas dukung tiang.
- c. **Pondasi Kaison** (*caisson*) yaitu suatu bentuk kotak atau silinder telah dicetak lebih dulu, dimasukkan ke dalam tanah, pada kedalaman tertentu, dan kemudian diisi beton. Kadang-kadang kaison juga disebut sebagai tiang bor yang berdiameter/lebar besar, sehingga kadang-kadang membingungkan dalam penyebutan.

D. Tanah

Tanah di alam terdiri dari campuran butiran-butiran mineral atau tanpa kandungan bahan organik. Butiran-butiran dengan mudah dipisah-pisahkan satu sama lain dengan kocokan air. Tanah berasal dari pelapukan batuan, yang prosesnya dapat secara fisik maupun kimia. Sifat-sifat teknis tanah, kecuali dipengaruhi oleh sifat batuan induk yang merupakan material asalnya, juga dipengaruhi oleh unsur-unsur luar yang menjadi penyebab terjadinya pelapukan batuan tersebut (Hardiyatmo, 2010).

E. Penelitian Tanah

Data penelitian tanah merupakan data sekunder dimana peneliti tidak langsung terjun ke lapangan sehingga data tersebut merupakan data yang diperoleh dari instansi yang terkait. Penelitian tanah dimaksudkan untuk mendapatkan data keadaan tanah pada titik yang telah ditentukan sebagai gambaran dasar keadaan tanah pada perencanaan pondasi konstruksi tangki minyak.

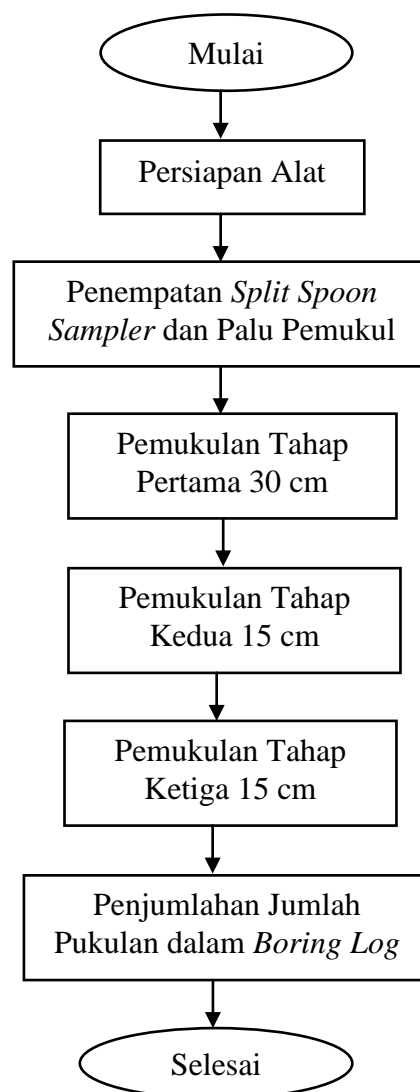
1. Pengujian dengan Bor Mesin

Pengujian dengan alat bor mesin dimaksudkan untuk mengetahui secara jelas kondisi lapisan tanah dari permukaan pengujian hingga kedalaman tanah keras yang ditentukan. Pekerjaan ini dilaksanakan dengan menggunakan mata bor *tungsteen* yang menghasilkan inti tanah atau batuan berdiameter 76 mm apabila dipakai *single core barrel* dan 50 mm apabila dipakai *double core barrel*. Pengujian dengan bor mesin (*log bor*) dilakukan sebanyak lima titik. Selanjutnya hasil deskripsi inti tanah hasil pemboran, kedalaman pengambilan contoh tanah tak terganggu (*undisturbed sample*) dan kedalaman muka air tanah dari setiap titik pemboran disajikan dalam bentuk diagram Boring Log (Laporan Investigasi Geoteknik Tarahan, 2011).

2. Pengujian dengan Alat SPT

Pada saat pekerjaan bor mesin berlangsung, dilakukan juga pengujian *Standard Penetration Test* (SPT) untuk setiap interval kedalaman 2 meter. SPT *test* dilakukan dengan cara menghitung jumlah pukulan palu

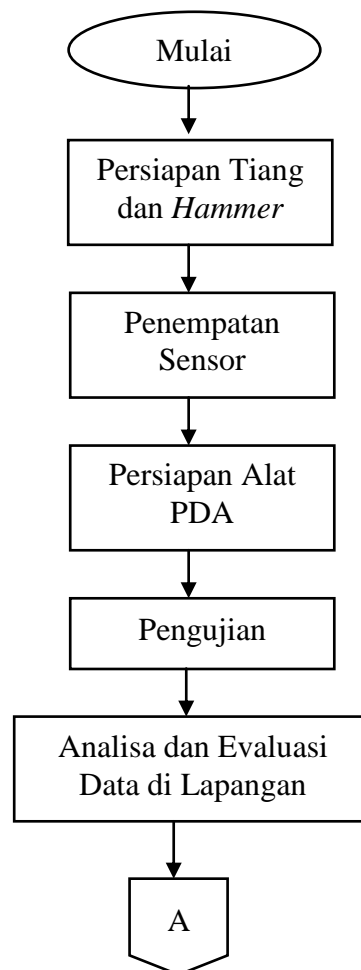
pemukul yang diperlukan untuk mendesak tabung contoh *Split Spoon Sampler* berdiameter 2 inchi sedalam 30 cm ke dalam tanah. Berat palu pemukul yang dipergunakan adalah 63,5 kg dengan tinggi jatuh 75 cm. Hasil pengujian *Standrad Penetration Test (SPT)* ini disajikan dalam bentuk grafik pada *Boring Log* (Laporan Investigasi Geoteknik Tarahan, 2011). Berikut adalah diagram alir *SPT Test*.

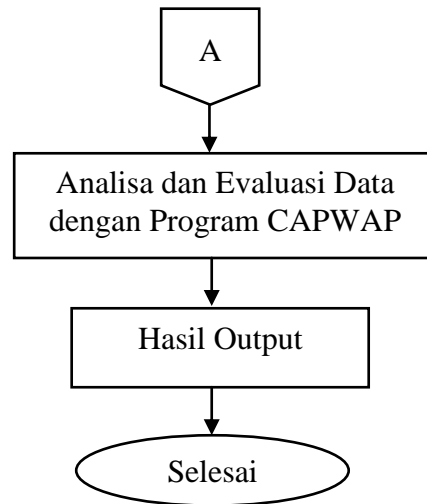


Gambar 1. Bagan alir *SPT Test*

3. Pengujian dengan Alat PDA (*Pile Driving Analyzer*)

PDA adalah suatu sistem pengujian dengan menggunakan data digital komputer yang diperoleh dari *strain transducer* dan *accelerometer* untuk memperoleh kurva gaya dan kecepatan ketika tiang dipukul menggunakan palu dengan berat tertentu. Pengujian ini dilaksanakan setelah tiang mempunyai kekuatan yang cukup untuk menahan tumbukan palu. PDA didasarkan pada analisis data hasil rekaman getaran gelombang yang terjadi pada waktu tiang dipukul. Pengujian PDA pada konstruksi tangki minyak ini dilakukan sebanyak 3 titik (Spesifikasi Teknis PDA, 2013). Berikut adalah diagram alir *PDA Test*.





Gambar 2. Bagan alir *PDA Test*

F. Pembebanan

Besar dan macam beban yang bekerja pada struktur sangat tergantung dari jenis struktur. Berikut ini akan disajikan jenis-jenis beban, data beban serta faktor-faktor dan kombinasi pembebanan sebagai dasar acuan bagi perhitungan struktur (Setiawan, 2008).

1. Beban mati (*Dead Load*)

Beban mati merupakan beban yang bekerja akibat gravitasi yang bekerja tetap pada posisinya secara terus menerus dengan arah ke bumi tempat struktur didirikan. Yang termasuk beban mati adalah berat struktur sendiri dan juga semua benda yang tetap posisinya selama struktur berdiri.

2. Beban hidup (*Live Load*)

Beban hidup merupakan beban yang terjadi akibat penghunian atau penggunaan suatu konstruksi dan barang-barang yang dapat berpindah, mesin

dan peralatan lain yang dapat digantikan selama masa pakai, air hujan, ataupun berat pekerja selama pengerjaan.

3. Beban gempa (*Earthquake Load*)

Besarnya beban gempa dasar nominal horizontal akibat gempa menurut Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Gedung (SNI – 1726 – 2002), dinyatakan sebagai berikut:

$$V = \frac{C \times I}{R} \times W_i \dots\dots\dots(1)$$

Dimana :

V = Beban gempa dasar nominal (beban gempa rencana)

W_i = Kombinasi dari beban mati dan beban hidup vertikal yang direduksi

C = Faktor respons gempa

I = Faktor keutamaan struktur

R = Faktor reduksi gempa

G. Kapasitas Daya Dukung Pondasi Tiang Berdasarkan Data Lapangan

1. Kapasitas Daya Dukung Tiang Dari Hasil SPT

Standard Penetration Test (SPT) adalah sejenis percobaan dinamis dengan memasukkan suatu alat yang dinamakan *split spoon* ke dalam tanah. Di dalam perencanaan pondasi tiang, data tanah sangat diperlukan dalam merencanakan kapasitas daya dukung (*bearing capacity*) dari tiang sebelum pembangunan dimulai.

Tahanan ujung ultimit tiang (Q_b) dinyatakan oleh persamaan:

$$Q_b = A_b \cdot f_b \dots\dots\dots(2)$$

Tahanan gesek dinding tiang (Q_s) dinyatakan oleh persamaan:

$$Q_s = A_s \cdot f_s \dots\dots\dots(3)$$

Kapasitas daya dukung ultimit tiang (Q_u), adalah jumlah dari tahanan ujung ultimit tiang (Q_b) dan tahanan gesek dinding tiang (Q_s) antara sisi tiang dan tanah di sekitarnya dinyatakan dalam persamaan berikut (Hardiyatmo, 2010):

$$Q_u = Q_b + Q_s = A_b \cdot f_b + A_s \cdot f_s \dots\dots\dots(4)$$

Dimana:

Q_b = Tahanan ujung ultimit tiang

Q_s = Tahanan gesek dinding tiang

A_b = Luas ujung tiang bawah

A_s = Luas selimut tiang

f_b = Tahanan ujung satuan tiang

f_s = Tahanan gesek satuan tiang

Kapasitas dukung ultimit tiang dapat dihitung secara empiris dari nilai N hasil uji SPT.

1. Untuk tahanan ujung tiang berdasarkan data pengujian SPT maka Meyerhof (Bowles, 1993) mengusulkan persamaan:

$$Q_b = A_b (40N) \leq A_b (400N) \dots\dots\dots(5)$$

Dimana:

N = Nilai rata-rata statistik dari bilangan-bilangan SPT dalam daerah kira-kira 8B di atas sampai dengan 3B di bawah titik tiang

B = Lebar atau diameter tiang

2. Untuk tahanan gesek selimut tiang berdasarkan data pengujian SPT maka Meyerhof (Bowles, 1993) mengusulkan persamaan:

$$Q_s = X_m \cdot N \cdot p \cdot L_i \dots\dots\dots(6)$$

Dimana:

$X_m = 2$ untuk tiang dengan perpindahan volume tanah yang besar, 1 untuk tiang yang mempunyai perpindahan volume tanah kecil dan 1,5 untuk tiang yang dipasang dengan cara menggali atau mengebor tanah.

L_i = Panjang lapisan tanah (m)

p = Keliling tiang (m)

N = Banyaknya perhitungan pukulan rata-rata statistik

H. Kapasitas Daya Dukung Tiang Berdasarkan Data Laboratorium

1. Kapasitas Daya Dukung Tiang dari Data Parameter Kuat Geser Tanah

Kapasitas ultimit tiang yang dipancang dalam tanah kohesif, adalah jumlah tahanan gesek sisi tiang dan tahanan ujungnya. Besar tahanan gesek tiang tergantung dari bahan dan bentuk tiang. Umumnya bila tanah homogen, tahanan gesek dinding yang berupa adhesi antara sisi tiang dan tanah akan berpengaruh besar pada kapasitas ultimitnya.

Berdasarkan hasil pemeriksaan tanah melalui beberapa percobaan, akan diperoleh nilai berat volume tanah (γ), nilai kohesif tanah (c) dan nilai sudut geser tanah (ϕ) (Hardiyatmo, 2010).

a. Daya Dukung Ujung Tiang (*End Bearing*)

Untuk tanah kohesif

$$Q_b = f_b A_b \dots\dots\dots(14)$$

$$f_b = c_u \cdot N_c \dots\dots\dots(15)$$

Dimana:

f_b = Tahanan ujung satuan tiang

Q_b = Tahanan ujung ultimit tiang

c_u = Kohesi pada kondisi tak terdrainase (*undrained*) tanah yang terletak di bawah ujung tiang yang nilainya diambil dari *undisturbed sample* (kN/m^2)

N_c = Faktor kapasitas dukung (fungsi dari ϕ) diambil sama dengan 9 (ton/m^2) menurut Skempton (Hardiyatmo,2010)

A_b = Luas penampang ujung bawah tiang (m^2)

Untuk tanah non kohesif

$$Q_b = A_p \cdot q' \cdot (N_q^* - 1) \dots\dots\dots(16)$$

Dimana:

q' = Tekanan vertikal efektif (ton/m^2)

N_q^* = Faktor daya dukung tanah

b. Daya Dukung Selimut Tiang (*Skin Friction*)

$$Q_s = f_s L p \dots\dots\dots(17)$$

Dimana:

f_s = Tahanan gesek satuan tiang

L = Panjang tiang (m)

p = Keliling penampang tiang (m)

Q_s = Daya dukung ultimit selimut tiang

Untuk tanah kohesif:

$$f_s = c_d = \alpha c_u \dots\dots\dots(18)$$

Dimana:

α = Faktor adhesi 0,45 menurut Skempton (Hardiyatmo, 2010)

c_u = Kohesi pada kondisi tak terdrainase

c_d = Adhesi

Untuk tanah non kohesif:

$$f_s = K_d \cdot p_o' \cdot \tan \delta \dots\dots\dots(19)$$

Dimana:

$K_d = 1 - \sin \phi$ (koefisien tekanan tanah yang tergantung dari kondisi tanah)

$\delta = 0,8 \cdot \phi$ (sudut gesek dinding efektif antara sisi tiang dan tanah)

$$p_o' = \gamma L' \text{ (tekanan vertikal efektif)}$$

$$L' = 15 D \text{ (D adalah diameter)}$$

I. Faktor Keamanan

Untuk memperoleh kapasitas ijin tiang, maka diperlukan untuk membagi kapasitas ultimit tiang dengan faktor aman tertentu. Fungsi faktor aman (Hardiyatmo, 2010) adalah:

1. Untuk memberikan keamanan terhadap ketidakpastian dari nilai kuat geser dan kompresibilitas yang mewakili kondisi lapisan tanah.
2. Untuk meyakinkan bahwa penurunan tidak seragam di antara tiang-tiang masih dalam batas-batas toleransi.
3. Untuk meyakinkan bahwa bahan tiang cukup aman dalam mendukung beban yang bekerja.
4. Untuk meyakinkan bahwa penurunan total yang terjadi pada tiang tunggal atau kelompok tiang masih dalam batas-batas toleransi.
5. Untuk mengantisipasi adanya ketidakpastian metode hitungan yang digunakan.

Besarnya beban kerja (*working load*) atau kapasitas tiang ijin ($Q_{u\text{izin}}$) dengan memperhatikan keamanan terhadap keruntuhan adalah nilai kapasitas ultimit (Q_u) dibagi dengan faktor aman (F) yang sesuai.

1. Tiang pancang

Variasi besarnya faktor aman yang telah banyak digunakan untuk perancangan tiang pancang:

$$Q_{u\text{izin}} = \frac{Q_u}{2,5} \dots\dots\dots(20)$$

Beberapa peneliti menyarankan faktor keamanan yang tidak sama untuk tahanan gesek dan tahanan ujung. Kapasitas izin dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$Q_{uiz\text{in}} = \frac{Q_b}{3} + \frac{Q_s}{1,5} \dots\dots\dots(21)$$

Penggunaan faktor keamanan 1,5 untuk tahanan gesek dinding (Q_s) yang harganya lebih kecil dari faktor keamanan tahanan ujung yang besarnya 3, karena nilai puncak tahanan gesek dinding dicapai bila tiang mengalami penurunan 2 sampai 7 mm, sedang tahanan ujung (Q_b) membutuhkan penurunan yang lebih besar agar tahanan ujungnya bekerja secara penuh. Jadi maksud penggunaan faktor keamanan tersebut adalah untuk meyakinkan keamanan tiang terhadap keruntuhan dengan mempertimbangkan penurunan tiang pada beban kerja yang diterapkan.

2. Tiang bor

Untuk dasar tiang yang dibesarkan dengan diameter < 2 m:

$$Q_{uiz\text{in}} = \frac{Q_u}{2,5} \dots\dots\dots(22)$$

Untuk tiang tanpa pembesaran di bagian bawahnya:

$$Q_{uiz\text{in}} = \frac{Q_u}{2} \dots\dots\dots(23)$$

Menurut Fleming et al (Hardiyatmo, 2010) jika penurunan bangunan tidak menjadi faktor penentu, misalnya tiang digunakan untuk mendukung tangki atau bangunan lain yang mengalami penurunan besar, tapi tidak mengalami kerusakan yang berarti, maka faktor aman dapat dipilih lebih rendah.

Tabel 1. Faktor Aman Untuk Tiang Pancang

Metode kontrol pelaksanaan	Faktor aman	
	Tiang tekan	Tiang tarik
Uji beban statis dengan analisis persamaan gelombang	2,0*	3,0*
Uji dinamik dengan analisis persamaan gelombang	2,25	4,0
Tiang indikator dengan analisis persamaan gelombang	2,50	5,0
Analisis persamaan gelombang	2,75	5,5
Formula pemancangan tiang**	3,50	6,0

* Jika uji beban statis sangat teliti, faktor aman beban tekan dapat direduksi 1,75 kalinya dan beban tarik 2,5 kalinya.

**Hannigan et al. (1997) menggunakan formula pancang dari Gates.

Sumber : Hardiyatmo, 2010

Tabel 2. Faktor Aman Untuk Tiang Bor

Informasi dalam perancangan			Faktor aman (<i>F</i>)	
Uji beban statis	Kondisi tanah	Program penyelidikan lokasi	Beban ke bawah (tiang tekan)	Beban ke atas (tiang tarik)
Ya	Seragam	Teliti	2,0*	3,0*
Ya	Tak teratur	Rata-rata	2,5	4,0
Tidak	Seragam	Teliti	2,5	5,0
Tidak	Seragam	Rata-rata	3,0	6,0
Tidak	Tak teratur	Teliti	3,0	6,0
Tidak	Tak teratur	Rata-rata	3,5	6,0

* Jika uji beban statis sangat teliti dan kondisi sifat-sifat tanah dapat didefinisikan dengan baik, faktor aman beban ke bawah dapat direduksi 1,7 kalinya dan beban ke atas 2,5 kalinya.

Sumber : Hardiyatmo, 2010

Umumnya, faktor aman untuk beban tarik lebih besar dari beban tekan. Hal ini, karena keruntuhan akibat beban tarik lebih bersifat segera dan merusakkan (terutama saat gempa).

J. Tiang Kelompok (Pile Group)

Kemungkinan konstruksi terdiri dari sebuah tiang pancang tunggal pondasi sangat jarang. Umumnya, paling sedikit dua atau tiga tiang di bawah elemen pondasi atau kaki pondasi dikarenakan masalah penjajaran dan eksentrisitas

yang kurang baik. Kode Bangunan Chicago mengatakan sebuah kolom atau pir yang ditopang oleh tiang pancang harus tinggal diam di atas tidak kurang dari tiga tiang pancang (Bowles, 1993).

Di atas *pile group*, biasanya diletakkan suatu konstruksi *poer (footing)* yang mempersatukan kelompok tiang tersebut. Dalam perhitungan-perhitungan *poer* dianggap/dibuat kaku sempurna, sehingga:

1. Bila beban-beban yang bekerja pada kelompok tiang tersebut menimbulkan penurunan maka setelah penurunan bidang *poer* tetap akan merupakan bidang datar.
2. Gaya-gaya yang bekerja pada tiang berbanding lurus dengan penurunan tiang-tiang tersebut.

1. Jarak Tiang

Umumnya semakin panjang tiang, semakin besar resiko kerusakan saat pemancangan (tiang pancang) atau pengeboran (tiang bor). Untuk alasan ini, Fellenius (Hardiyatmo, 2010) menyarankan jarak minimum tiang yang merupakan fungsi dari panjang tiang:

$$s = 2,5d + 0,02L \dots\dots\dots(24)$$

Dengan:

s = Jarak minimum sumbu tiang (m)

d = Diameter atau lebar tiang (m)

L = Kedalaman penetrasi tiang (m)

K. Kapasitas Kelompok Tiang dan Efisiensi Tiang

1. Kapasitas kelompok tiang tidak selalu sama dengan jumlah kapasitas tiang tunggal yang berada dalam kelompoknya. Stabilitas kelompok tiang tergantung dari 2 (dua) hal, yaitu:

- a. Kapasitas dukung tanah di sekitar dan di bawah kelompok tiang untuk mendukung beban total struktur.
- b. Pengaruh konsolidasi tanah yang terletak di bawah kelompok tiang.

Jika kelompok tiang dalam tanah lunak, pasir tidak padat, atau timbunan, dengan dasar tiang yang bertumpu pada lapisan kaku, maka kelompok tiang tersebut tidak mempunyai resiko akan mengalami keruntuhan geser umum (*general shear failure*), jika diberikan faktor aman yang cukup terhadap bahaya keruntuhan tiang tunggalnya. Akan tetapi, penurunan kelompok tiang masih tetap harus diperhitungkan secara keseluruhan ke dalam tanah lempung lunak (Hardiyatmo,2010).

2. Efisiensi Tiang

Efisiensi tiang bergantung pada beberapa faktor, yaitu:

- a. Jumlah, panjang, diameter, susunan dan jarak tiang.
- b. Model transfer beban (tahanan gesek terhadap tahanan dukung ujung).
- c. Prosedur pelaksanaan pemasangan tiang.
- d. Urutan pemasangan tiang
- e. Macam-macam tanah.
- f. Waktu setelah pemasangan tiang.
- g. Interaksi antara pelat penutup tiang (*pile cap*) dengan tanah.
- h. Arah dari beban yang bekerja.

Persamaan dari efisiensi tiang menurut *Converse-Labarre Formula* (Hardiyatmo, 2010) adalah sebagai berikut:

$$E_g = 1 - \theta \frac{(n'-1)m + (m-1)n'}{90mn'} \dots\dots\dots(25)$$

Dengan:

E_g = efisiensi kelompok tiang

m = jumlah baris tiang

n' = jumlah tiang dalam satu baris

υ = arc tg d/s , dalam derajat

s = jarak pusat ke pusat tiang

d = diameter tiang

Efisiensi kelompok tiang didefinisikan sebagai:

$$E_g = \frac{Q_g}{nQ_u} \dots\dots\dots(26)$$

Dengan:

E_g = Efisiensi kelompok tiang

Q_g = Beban maksimum kelompok tiang yang mengakibatkan keruntuhan

Q_u = Beban maksimum tiang tunggal yang mengakibatkan keruntuhan

n = Jumlah tiang dalam kelompok

3. Kapasitas Izin Kelompok Tiang

Kapasitas izin kelompok tiang menggunakan persamaan:

$$\text{Kapasitas izin kelompok tiang} = E_g \times n \times Q_u \dots\dots\dots(27)$$

4. Pembebanan pada Pondasi Kelompok Tiang

Gaya luar yang bekerja pada kepala tiang (kolom) didistribusikan pada *pile cap* dan kelompok tiang pondasi berdasarkan rumus elastisitas dengan menganggap bahwa *pile cap* kaku sempurna (pelat pondasi cukup

tebal), sehingga pengaruh gaya yang bekerja tidak menyebabkan *pile cap* melengkung atau deformasi.

Maka persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$P = \frac{V}{n} \pm \frac{M_y x_i}{\sum x^2} \pm \frac{M_x y_i}{\sum y^2} \dots\dots\dots(28)$$

Dengan:

P = Beban maksimum yang diterima oleh tiang

$\sum V$ = Jumlah total beban normal

M_x = Momen yang bekerja pada bidang yang tegak lurus sumbu x

M_y = momen yang bekerja pada bidang yang tegak lurus sumbu y

x = absis terhadap titik berat kelompok tiang

y = ordinat terhadap titik berat kelompok tiang

$\sum x^2$ = jumlah kuadrat absis-absis tiang

$\sum y^2$ = jumlah kuadrat ordinat-ordinat tiang

L. Penurunan (*Settlement*)

Dalam kelompok tiang (*pile group*) ujung atas, tiang-tiang tersebut dihubungkan satu dengan yang lain dengan *poer* yang kaku, sehingga merupakan satu kesatuan yang kokoh (Hardiyatmo, 2010). Dengan *poer* ini diharapkan bila kelompok tiang tersebut dibebani secara merata akan terjadi *settlement* yang merata pula. Penurunan kelompok tiang selalu lebih besar daripada penurunan sendiri terhadap beban yang sama. Dengan beban yang sama penurunan kelompok tiang akan lebih besar bila jumlah tiang bertambah.

1. Penurunan Pada Tiang Tunggal

Rumus perhitungan penurunan total tiang tunggal (Sholeh, 2008):

$$S = S1 + S2 + S3 \dots \dots \dots (29)$$

$$S1 = \frac{(Qb + \alpha Qs)L}{Ab Ep} \dots \dots \dots (30)$$

Dimana:

S1 = Penurunan akibat deformasi tiang tunggal

Qb = Daya dukung ujung tiang

Qs = Daya dukung selimut tiang

Ap = Luas ujung tiang bawah

L = Panjang tiang

Ep = Modulus elastisitas material tiang

α = 0,5 jika distribusi gesekan berbentuk parabola atau 0,67 jika berbentuk segitiga

$$S2 = \frac{Cp \times Qb}{D \times qp} \dots \dots \dots (31)$$

Dimana:

S2 = Penurunan tiang disebabkan oleh beban yang bekerja pada ujung tiang

Cp = Koefisien empiris

D = Diameter tiang

qp = Daya dukung batas ujung tiang

Tabel 3. Nilai Koefisien Cp

Jenis Tanah	Tiang Pancang	Tiang Bor
Pasir	0,02 – 0,04	0,09 – 0,18
Lempung	0,02 – 0,03	0,03 – 0,06
Lanau	0,03 – 0,05	0,09 – 0,12

Sumber: Sholeh, 2008

$$S_3 = \left(\frac{Q_s}{p \times L} \right) \times \frac{D}{E_s} \times (1 - \mu_s^2) \times I_{ws} \dots \dots \dots (32)$$

Dimana:

S_3 = Penurunan tiang disebabkan oleh beban yang bekerja sepanjang kulit/selimut tiang

p = Keliling penampang tiang

L = Panjang tiang

E_s = Modulus elastisitas tanah

μ_s = Angka *Poisson*

I_{ws} = Faktor pengaruh

Faktor pengaruh menurut Vesic (Sholeh, 2008) yaitu:

$$I_{ws} = 2 + 0,35 \sqrt{\frac{L}{D}}$$

Tabel 4. Angka *Poisson*

Macam tanah	μ
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 kasar (angka pori, $e = 0,4 - 0,7$)	0,15
Pasir halus (angka pori, $e = 0,4 - 0,7$)	0,25
Batu (agak tergantung dari macamnya)	0,1 - 0,4
<i>Loess</i>	0,1 - 0,3

Sumber: Hardiyatmo, 2011

Tabel 5. Modulus Elastisitas Tanah (Es)

Jenis Tanah	E_s (kN/m ²)
Lempung	
Sangat lunak	300 - 3000
Lunak	2000 - 4000
Sedang	4500 - 9000
Keras	7000 - 20000
Berpasir	30000 - 42500
Pasir	
Berlanau	5000 - 20000
Tidak padat	10000 - 25000
Padat	50000 - 100000
Pasir dan kerikil	
Padat	80000 - 200000
Tidak padat	50000 - 140000
Lanau	2000 - 20000
Loess	15000 - 60000
Serpilh	140000 - 1400000

Sumber : Hardiyatmo, 2011

2. Penurunan Pada Tiang Kelompok

Hubungan penurunan antara tiang tunggal dan kelompok tiang menurut Vesic (Sholeh, 2008):

$$S_g = S \sqrt{\frac{B_g}{D}} \dots\dots\dots(33)$$

Dimana:

S_g = Penurunan kelompok tiang (m)

B_g = Lebar kelompok tiang (m)

S = Penurunan tiang tunggal pada intensitas beban yang sama (m)

D = Diameter tiang (m)

M. Daya Dukung Lateral

Pondasi tiang sering harus dirancang dengan memperhitungkan beban-beban horizontal atau lateral, seperti beban angin, tekanan tanah lateral, beban gelombang air, benturan kapal dan lain-lain. Gaya lateral yang terjadi pada tiang bergantung pada kekakuan atau tipe tiang, macam tanah, penanaman ujung tiang ke dalam pelat penutup tiang, sifat gaya-gaya dan besar defleksi. Jika gaya lateral yang harus didukung tiang sangat besar, maka dapat digunakan tiang miring (Hardiyatmo, 2010).

1. Tiang Ujung Jepit dan Tiang Ujung Bebas

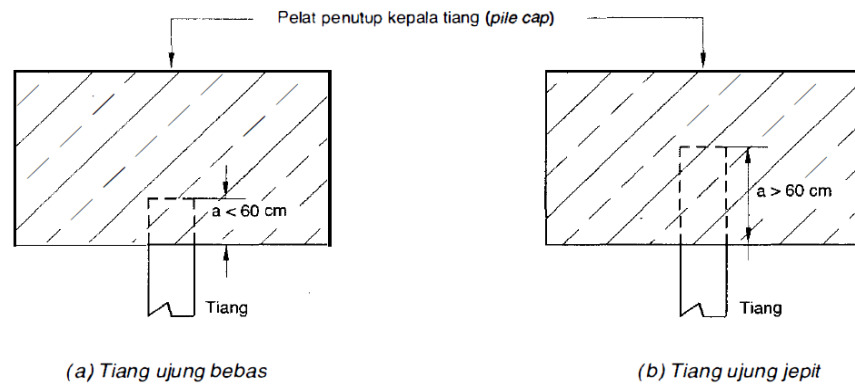
Dalam analisis gaya lateral, tiang-tiang perlu dibedakan menurut model ikatannya dengan pelat penutup tiang. Karena, model ikatan tersebut sangat mempengaruhi kelakuan tiang dalam mendukung beban lateral. Sehubungan dengan hal tersebut, tiang-tiang dibedakan menurut 2 tipe, yaitu:

a. Tiang ujung jepit (*fixed end pile*)

McNulty (Hardiyatmo, 2010) mendefinisikan tiang ujung jepit (*fixed end pile*) sebagai tiang yang ujung atasnya terjepit (tertanam) dalam pelat penutup kepala tiang paling sedikit sedalam 60 cm (24 inchi).

b. Tiang ujung bebas (*free end pile*)

Tiang ujung bebas (*free end pile*) yaitu tiang yang bagian atasnya tidak terjepit ke dalam pelat penutup kepala tiang tetapi kurang dari 60 cm.



Gambar 3. Definisi Tiang Ujung Jepit dan Ujung Bebas

2. Daya Dukung Lateral Tiang Tunggal

Berdasarkan hasil penelitian Poulos, defleksi maksimum terjadi pada permukaan tanah. Defleksi tersebut diakibatkan adanya beban horisontal dan momen yang terjadi pada kepala tiang.

Kapasitas material tiang dirumuskan sebagai berikut:

$$M_y = \sigma_y \frac{I_p}{z} \dots \dots \dots (36)$$

Dimana:

σ_y = Mutu beton (2400 kg/cm^2)

I_p = Momen inersia beton (m^4)

z = 0,5 dari diameter pondasi

Metode Broms (Hardiyatmo, 2010) untuk tiang pendek:

$$H_u = 9c_u d(L - 3d/2) \dots \dots \dots (37)$$

$$M_{\text{mak}} = H_u (L/2 + 3d/4) \dots \dots \dots (38)$$

$$M_y = (9/4) c_u d g^2 - 9c_u d f(3d/2 + f/2) \dots \dots \dots (39)$$

Untuk tiang panjang:

$$H_u = \frac{2 M_Y}{\frac{3d}{2} + \frac{f}{2}} \dots\dots\dots(40)$$

Dimana:

H_u = Daya dukung lateral

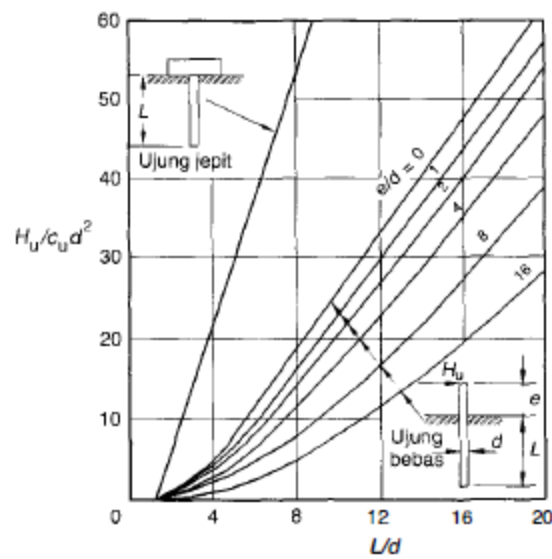
M_y = Tahanan momen tiang

M_{mak} = Momen (negatif) pada kepala tiang

L = Kedalaman pondasi

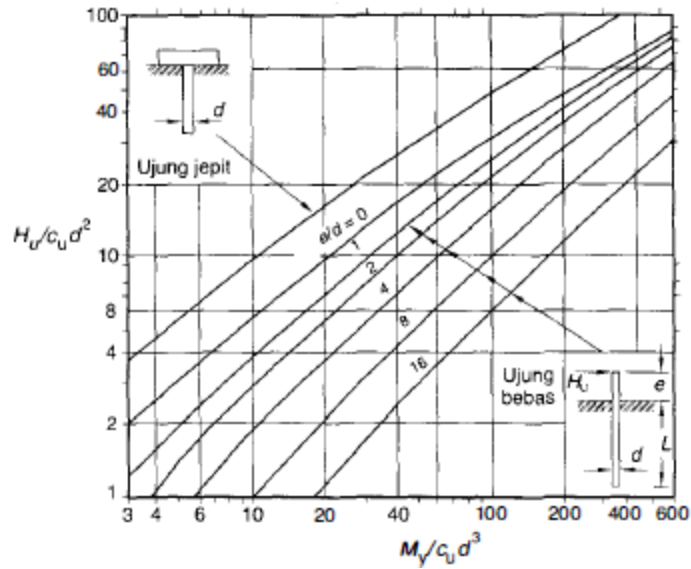
f = $H_u/(9c_u d)$ = Letak momen maksimum

K_p = Nilai dari $\tan^2 (45^\circ + \frac{\theta}{2})$



Gambar 4. Grafik Tahanan Lateral Ultimit Tiang Pendek

Sumber: Hardiyatmo, 2010



Gambar 5. Grafik Tahanan Lateral Ultimit Tiang Panjang

Sumber: Hardiyatmo, 2010

3. Daya Dukung Lateral Kelompok Tiang

Daya dukung kelompok tiang dirumuskan sebagai berikut:

$$H_g = \sum_{j=1}^n H_u \dots \dots \dots (40)$$

Dimana:

H_g = Beban lateral kelompok tiang

H_u = Beban lateral tiang tunggal

n = Jumlah tiang

4. Defleksi Kelompok Tiang

Defleksi kelompok tiang menggunakan metode Broms (1964a).

Defleksi tiang dikaitkan dengan faktor tak berdimensi βL dengan:

$$(\beta) = \left(\frac{k_h \times d}{4 \times E_p \times I_p} \right)^{0,25}$$

Defleksi ujung tiang di permukaan tanah (y_0) bergantung pada beberapa tipe yaitu:

1. Tiang ujung jepit dianggap berkelakuan seperti tiang pendek bila

$\beta L < 1,5$ dengan:

$$(y_0) = \left(\frac{h_{ijin}}{k_h \times d \times L} \right)$$

Dengan k_h yaitu koefisien reaksi subgrade horizontal.

2. Tiang ujung bebas dianggap seperti tiang panjang (tidak kaku) bila

$\beta L > 1,5$ defleksi tiang di permukaan tanah dengan:

$$(y_0) = \left(\frac{2 \times h_{ijin} \times \beta (e\beta + 1)}{k_h \times d} \right)$$

$$(\theta) = \left(\frac{2 \times h_{ijin} \times \beta^2 (1 + 2e\beta)}{k_h \times d} \right)$$