

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Pondasi *Bored Pile*

Pondasi *bored pile* adalah pondasi tiang yang pemasangannya dilakukan dengan mengebor tanah lebih dahulu (Hary Christady Hardiyatmo, 2010).

Pemasangan pondasi *bored pile* ke dalam tanah dilakukan dengan cara mengebor tanah terlebih dahulu, yang kemudian diisi tulangan yang telah dirangkai dan dicor beton. Apabila tanah mengandung air, maka dibutuhkan pipa besi atau yang biasa disebut dengan *temporary casing* untuk menahan dinding lubang agar tidak terjadi kelongsoran, dan pipa ini akan dikeluarkan pada waktu pengecoran beton

Ada beberapa keuntungan dalam pemakaian pondasi *bored pile* jika dibandingkan dengan tiang pancang, yaitu:

1. Pemasangan tidak menimbulkan gangguan suara dan getaran yang membahayakan bangunan sekitarnya.
2. Mengurangi kebutuhan beton dan tulangan *dowel* pada pelat penutup tiang (*pile cap*). Kolom dapat secara langsung diletakkan di puncak *bored pile*.
3. Kedalaman tiang dapat divariasikan.
4. Tanah dapat diperiksa dan dicocokkan dengan data laboratorium.
5. *Bored pile* dapat dipasang menembus batuan, sedang tiang pancang akan kesulitan bila pemancangan menembus lapisan batuan.

6. Diameter tiang memungkinkan dibuat besar, bila perlu ujung bawah tiang dapat dibuat lebih besar guna mempertinggi kapasitas dukungnya.
7. Tidak ada risiko kenaikan muka tanah.

Kerugian menggunakan pondasi *bored pile* 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 *bored pile* mengurangi kapasitas dukung *bored pile*, terutama bila *bored pile* cukup dalam.
4. Pengeboran dapat mengakibatkan gangguan kepadatan, bila tanah berupa pasir atau tanah yang berkerikil.
5. Air yang mengalir ke dalam lubang bor dapat mengakibatkan gangguan tanah, sehingga mengurangi kapasitas dukung tiang.
6. Akan terjadi tanah runtuh jika tindakan pencegahan tidak dilakukan, maka dipasang *temporary casing* untuk mencegah terjadinya kelongsoran.

B. Metode Pelaksanaan *Bored Pile*

Pada dasarnya pelaksanaan *bored pile* pada tanah yang tidak mudah longsor adalah:

1. Tanah digali dengan mesin bor sampai kedalaman yang dikehendaki.
2. Dasar lubang bor dibersihkan.
3. Tulangan yang telah dirakit dimasukkan ke dalam lubang bor.
4. Lubang bor diisi atau dicor beton.

C. Tanah

Tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel-partikel padat tersebut (Braja M. Das, 1995)

D. 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 Gedung Bertingkat Terpadu di Pelabuhan Tarahan Bandar Lampung.

1. Pengujian dengan Bor Mesin

Pengujian dengan alat bor mesin 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*. Tujuan dilakukan pengujian dengan bor mesin ini adalah untuk mengetahui kondisi lapisan tanah. Pengujian dengan bor mesin pada lokasi proyek ini dilakukan sebanyak lima titik. Pengujian di lapangan dilakukan oleh PT. Bitar Enarcon Engineering dan pengujian sampel tanah tak terganggu (*undisturbed sample*) dengan parameter

pengujian kadar air, berat jenis, berat volume, *atterberg limits*, *grainsize analysis*, *triaxial test*, serta uji konsolidasi dilakukan di laboratorium (Laporan Investigasi Geoteknik Tarahan, 2011). Pengujian dengan bor mesin dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Pengujian dengan Bor Mesin

2. Pengujian dengan Alat SPT (*Standard Penetration Test*)

Pengujian *Standard Penetration Test* (SPT) dilaksanakan bersamaan dengan pengujian Bor Mesin. Pengujian SPT ini dilakukan untuk setiap interval kedalaman 2 meter. SPT *test* menggunakan palu pemukul dengan berat 63,5 kg dan tinggi jatuh 75 cm. Pengujian ini dilakukan dengan cara menghitung jumlah pukulan palu pemukul yang diperlukan untuk mendesak tabung contoh *Split Spoon Sampler* berdiameter 2” sedalam 30 cm ke dalam tanah. Penghitungan jumlah pukulan dilakukan sebanyak 3 kali yaitu setiap penetrasi 15 cm. Nilai SPT didapatkan dengan menjumlahkan jumlah pukulan yang diperlukan pada 15 cm penetrasi kedua dan ketiga. Hasil pengujian *Standrad Penetration Test* (SPT) disajikan dalam bentuk grafik pada *Boring Log* (Laporan Investigasi

Geoteknik Tarahan, 2011). Berikut adalah tabel standar deskripsi kekuatan tanah dengan penetrasi standar:

Tabel 1. Standar Penetrasi Tanah Tak Berkohesi

Tingkat Kepadatan	Dr	N	
Sangat lepas	< 0,2	< 4	< 30
Lepas	0,2 – 0,4	4 – 10	30 – 35
Sedang	0,4 – 0,6	10 – 30	35 – 40
Padat	0,6 – 0,8	30 – 50	40 – 45
Sangat padat	0,8 – 1,0	> 50	45

Sumber: Ralph, 1973

Tabel 2. Standar Penetrasi Tanah Berkohesi

Penetrasi Standar (N)	Deskripsi
0 – 2	Sangat lunak
2 – 4	Lunak
4 – 8	Sedang
8 – 16	Kenyal
16 – 32	Sangat kenyal
32 – 40	Keras

Sumber: Punmia, 1981

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

Pengujian dengan alat *Pile Driving Analyzer* PDA dapat memberikan informasi-informasi penting yang berkaitan dengan interaksi pondasi *bored pile* dengan tanah dibawah beban aksial yang diberikan. Hasil-hasil yang didapat dari pengujian dengan PDA ini adalah kapasitas tiang, transfer energi *hammer* ke tiang, tegangan tekan dan tarik yang bekerja pada tiang akibat tumbukan, serta integritas (keutuhan) tiang. Pelaksanaan pengujian ini dengan menjatuhkan sebuah massa *hammer* ke kepala tiang untuk membangkitkan gelombang tegangan yang nantinya akan ditangkap

atau direkam oleh sensor-sensor yang telah dilekatkan di sisi tiang, pengujian 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 (Spesifikasi Teknis PDA, 2013). Pengujian PDA pada proyek Gedung Bertingkat Terpadu di Pelabuhan Tarahan Bandar Lampung dilakukan sebanyak 3 titik. Gambar pengujian dengan alat PDA dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pengujian dengan Alat PDA (*Pile Driving Analyzer*)

E. 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. (LRFD, 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.

3. Beban Angin (*Wind Load*)

Beban angin adalah semua beban yang bekerja pada gedung atau bagian gedung yang disebabkan oleh selisih dalam tekanan udara. Beban angin ditunjukkan dengan menganggap adanya tekanan positif dan tekanan negatif (isapan), yang bekerja tegak lurus pada bidang – bidang yang ditinjau. Besarnya tekanan positif dan tekanan negatif ini dinyatakan dalam kg/m^2 , ditentukan dengan mengalikan tekanan tiup yang telah ditentukan dengan koefisien – koefisien angin yang telah ditentukan dalam peraturan ini.

Tabel 3. *Combined Height, Exposure and Gust Factor Coefficient (Ce)*^a

Height above average level of adjoining ground (feet) × 304.8 for mm	Exposure D	Exposure C	Exposure B
0–15	1.39	1.06	0.62
20	1.45	1.13	0.67
25	1.50	1.19	0.72
30	1.54	1.23	0.76
40	1.62	1.31	0.84
60	1.73	1.43	0.95
80	1.81	1.53	1.04
100	1.88	1.61	1.13
120	1.93	1.67	1.20
160	2.02	1.79	1.31
200	2.10	1.87	1.42
300	2.23	2.05	1.63
400	2.34	2.19	1.80

^a Values for intermediate heights above 15 feet (4572 mm) may be interpolated.
(From UBC 1997, Table 16-G.)

Tabel 4. Koefisien Tekanan C_g

Description	C_g
Method 1 (Normal force method) Maximum height 400 ft	
Walls	
Windward wall	0.8 inward
Leeward wall	0.5 outward
Roof	
Wind perpendicular to ridge	
Leeward roof or flat roof	0.7 outward
Windward roof	
Slope less than 2:12 (16.7%)	0.7 outward
Slope 2:12 (16.7%) to less than 9:12 (75%)	0.9 outward or 0.3 inward
Slope 9:12 (75%) to 12:12 (100%)	0.4 inward
Slope > 12:12 (100%)	0.7 inward
Wind parallel to ridge and flat roofs	0.7 outward
Method 2 (Projected area method) Maximum height 200 ft	
On vertical projected area	
Structures 40 feet (12.19 m) or less in height	1.3 horizontal any direction
Structures over 40 feet (12.19 m) in height	1.4 horizontal any direction
On horizontal projected area	
	0.7 upward

(From UBC 1997.)

4. Beban Gempa (*Earthquake Load*)

Besarnya beban gempa dasar nominal horizontal akibat gempa menurut Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Rumah dan Gedung (SNI – 03 – 1726 – 2002), dinyatakan sebagai berikut :

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

Keterangan:

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

Tabel 5. Faktor Keutamaan Struktur (I)

Kategori gedung	Faktor Keutamaan		
	I ₁	I ₂	I
Gedung umum seperti untuk perumahan, perniagaan dan perkantoran	1,0	1,0	1,0
Monumen dan bangunan monumental	1,0	1,6	1,6
Gedung penting pasca gempa seperti rumah sakit, instalasi air bersih, pembangkit tenaga listrik, pusat penyelamatan dalam keadaan darurat, fasilitas radio dan televisi.	1,4	1,0	1,4
Gedung untuk menyimpan bahan berbahaya seperti gas, produk minyak bumi, asam, bahan beracun.	1,6	1,0	1,6
Cerobong, tangki di atas menara	1,5	1,0	1,5

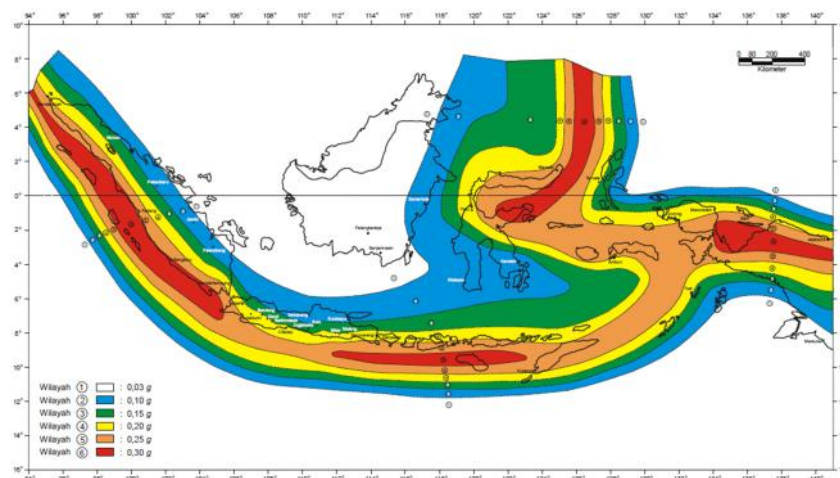
Tabel 6. Parameter daktilitas struktur gedung

Taraf kinerja struktur gedung	μ	R pers.(ϕ)
Elastik penuh	1,0	1,6
Daktil parsial	1,5	2,4
	2,0	3,2
	2,5	4,0
	3,0	4,8
	3,5	5,6
	4,0	6,4
	4,5	7,2
5,0	8,0	
Daktil penuh	5,3	8,5

Besarnya beban gempa sangat dipengaruhi oleh berat dari struktur bangunan, untuk itu diperlukan menghitung berat dari masing-masing lantai bangunan. Berat dari bangunan berupa beban mati yang terdiri dari berat sendiri material-material konstruksi, elemen-elemen struktur, dan beban hidup dari penggunaan bangunan. Kemungkinan terjadinya gempa bersamaan dengan bekerjanya beban hidup pada konstruksi gedung sangat kecil, karena itu beban hidup yang bekerja dapat direduksi. Sesuai standar pembebanan yang berlaku di Indonesia, untung menghitung pengaruh beban gempa pada konstruksi gedung yaitu mengalikan beban hidup yang bekerja dengan faktor reduksi sebesar 0,3.

F. Faktor Respons Gempa (C)

Setelah menghitung waktu getar dari struktur bangunan pada arah X (Tx) dan arah Y (Ty), maka besar dari Faktor Respons Gempa (C) dapat ditentukan dari diagram spektrum gempa rencana sesuai dengan wilayah gempa dan kondisi tanah untuk waktu getar alami fundamental, dengan terlebih dahulu menentukan zona gempa (lihat Gambar 3).



Gambar 3. Wilayah Gempa Indonesia

Faktor respon gempa C ditentukan dengan persamaan-persamaan berikut:

Untuk $T \leq T_c$:

$$C = A_m \dots\dots\dots(2)$$

Untuk $T > T_c$:

$$C = \frac{A_r}{T} \dots\dots\dots(3)$$

Dengan:

$$A_m = 2,5 A_o \dots\dots\dots(4)$$

$$A_r = A_m \cdot T_c \dots\dots\dots(5)$$

Nilai A_o , A_m , dan A_r tercantum dalam Tabel 7 dan Tabel 8 untuk masing-masing wilayah gempa dan jenis tanah.

Tabel 7. Percepatan Puncak Batuan Dasar dan Percepatan Muka Tanah

Wilayah Gempa	Percepatan puncak batuan dasar ('g')	Percepatan puncak muka tanah A_0 ('g')			
		Tanah Keras	Tanah Sedang	Tanah Lunak	Tanah Khusus
3	0,15	0,18	0,23	0,30	setiap lokasi
4	0,20	0,24	0,28	0,34	
5	0,25	0,28	0,32	0,36	
6	0,30	0,33	0,36	0,38	

Tabel 8. Spektrum Respon Gempa Rencana

Wilayah Gempa	Tanah Keras $T_c = 0,5$ det.		Tanah Sedang $T_c = 0,6$ det.		Tanah Lunak $T_c = 1,0$ det.	
	A_m	A_r	A_m	A_r	A_m	A_r
1	0,10	0,05	0,13	0,08	0,20	0,20
2	0,30	0,15	0,38	0,23	0,50	0,50
3	0,45	0,23	0,55	0,33	0,75	0,75
4	0,60	0,30	0,70	0,42	0,85	0,85
5	0,70	0,35	0,83	0,50	0,90	0,90
6	0,83	0,42	0,90	0,54	0,95	0,95

G. Kapasitas Daya Dukung Pondasi Tiang Berdasarkan Data Lapangan

1. Kapasitas Daya Dukung Pondasi Tiang Dari Hasil SPT

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

Tahanan ujung ultimit tiang (Q_b) dihitung dengan persamaan:

$$Q_b = A_b \cdot f_b \dots\dots\dots(6)$$

Tahanan gesek dinding tiang (Q_s) dihitung dengan persamaan:

$$Q_s = A_s \cdot f_s \dots\dots\dots(7)$$

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 ini (Hardiyatmo, 2010):

$$Q_u = Q_b + Q_s = A_b \cdot f_b + A_s \cdot f_s \dots\dots\dots(8)$$

Keterangan:

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. Tahanan ujung tiang berdasarkan data pengujian SPT dihitung dengan persamaan Meyerhof (Bowles, 1993), yaitu:

$$Q_b = A_b (40N) \quad A_b (400N) \dots\dots\dots(9)$$

Keterangan:

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

L_b/B = Perbandingan kedalaman rata-rata dari sebuah titik

2. Tahanan gesek selimut tiang berdasarkan data pengujian SPT dihitung dengan persamaan Meyerhoff (Bowles, 1993), yaitu:

$$Q_s = X_m \cdot N \cdot p \cdot L_i \dots\dots\dots(10)$$

Keterangan:

$X_m = 0,2$ untuk *bored pile*

L_i = Panjang lapisan tanah (m)

P = Keliling tiang (m)

N = Banyaknya perhitungan pukulan rata-rata statistic

3. Untuk tahanan ujung tiang dengan memperhatikan faktor kedalaman dihitung dengan persamaan Meyerhof (Hardiyatmo, 2010), yaitu:

$$Q_b = A_b \cdot f_b$$

Dengan nilai f_b yaitu :

- a. Untuk tiang dalam pasir dan kerikil:

$$f_b = 0,4 N''(L/d) \sigma_r \quad 4 N'' \sigma_r \dots\dots\dots(11)$$

- b. Untuk tiang dalam lanau tidak plastis:

$$f_b = 0,4 N''(L/d) \sigma_r \quad 3 N'' \sigma_r \dots\dots\dots(12)$$

Keterangan:

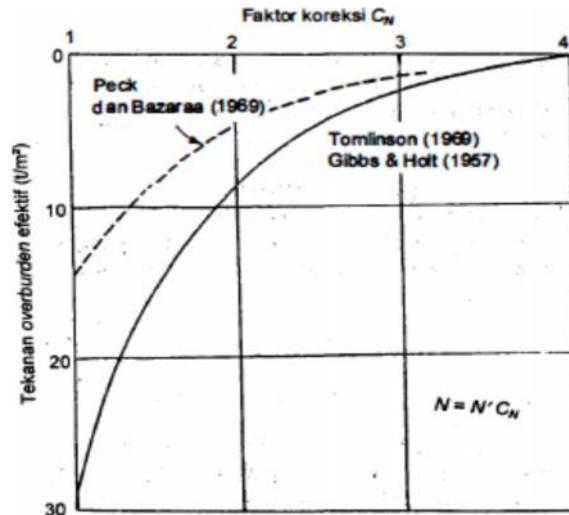
f_b = Tahanan ujung satuan tiang (kN/m^2)

N'' = N -SPT yang dikoreksi terhadap pengaruh prosedur lapangan dan tekanan *overburden*

L = Kedalaman penetrasi tiang (m)

d = Diameter tiang (m)

σ_r = Tegangan referensi = 100 kN/m^2



Gambar 4. Koreksi nilai N akibat tekanan *overburden*

Untuk menghitung f_b , nilai N-SPT yang digunakan harus mewakili kondisi tanah di sekitar ujung tiang yaitu dalam kisaran 1D di atas dasar tiang dan 2D di bawahnya.

4. Tahanan gesek satuan dihitung dengan persamaan Meyerhof (Hardiyatmo, 2010)

$$Q_s = A_s \cdot f_s$$

Briaud et al. (Hardiyatmo, 2010) menyarankan persamaan tahanan ujung satuan, yaitu:

$$f_s = 0,224 \cdot \sigma_r (N'')^{0,29} \dots\dots\dots(13)$$

$$f_b = 19,7 \cdot \sigma_r (N'')^{0,36} \dots\dots\dots(14)$$

Keterangan:

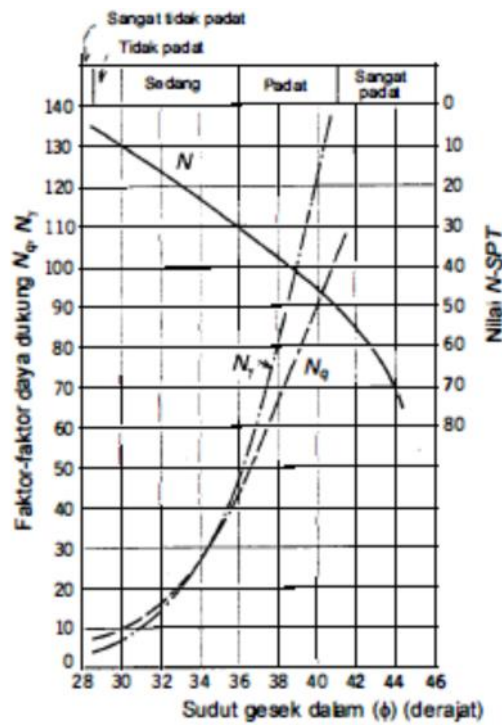
f_s = Tahanan gesek satuan tiang (kN/m^2)

f_b = Tahanan ujung satuan tiang (kN/m^2)

N'' = N-SPT yang dikoreksi terhadap pengaruh prosedur lapangan dan tekanan *overburden*.

σ_r = Tegangan referensi = 100 kN/m^2

Dalam pengujian SPT ini juga akan diperoleh kepadatan relatif (*relative density*), sudut gesek dalam (ϕ) berdasarkan nilai jumlah pukulan (N). Untuk tanah granuler, seperti pasir faktor-faktor N_q , N_c adalah fungsi dari ϕ , karena itu sangat tergantung dari besarnya kerapatan relatif (D_r).



Gambar 5. Hubungan nilai N , N_q , N_c dan ϕ (Hardiyatmo,1996)

Dengan memperhatikan bentuk pondasi, kemiringan beban dan kuat geser tanah di atas dasar pondasinya Meyerhof dan Brinch Hansen (Hardiyatmo, 1996) memberikan juga persamaan daya dukung yaitu:

$$Q_u = S_c D_c i_c N_c + S_q D_q i_q P_o N_q + S D i 0,5 ' N \dots\dots\dots(15)$$

Keterangan:

Q_u = Kapasitas daya dukung ultimit

N_c , N_q , N = Faktor kapasitas dukung untuk pondasi memanjang

s_c , s_q , s = Faktor bentuk pondasi

d_c, d_q, d	= Faktor kedalaman pondasi
i_c, i_q, i	= Faktor kemiringan beban
b'	= Lebar pondasi efektif
p_o	= Tekanan <i>overbuden</i> pada dasar pondasi
D_f	= Kedalaman pondasi
	= Berat volume tanah

H. Faktor Keamanan

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

Menurut Tomlinson (1977) dalam buku Analisis dan Perencanaan Pondasi 2 faktor aman dinyatakan:

Untuk dasar tiang yang dibesarkan dengan diameter < 2 m:

$$Q_a = \frac{Q_u}{2,5} \dots\dots\dots(22)$$

Untuk tiang tanpa pembesaran di bagian bawahnya:

$$Q_a = \frac{Q_u}{2} \dots\dots\dots(23)$$

Bila diameter tiang lebih dari 2 m, kapasitas tiang ijin perlu dievaluasi dari pertimbangan penurunan tiang. Selanjutnya, penurunan struktur harus pula dicek terhadap persyaratan besar penurunan toleransi yang masih diijinkan. Faktor aman (F) untuk tiang bor juga bergantung terutama pada informasi dari hasil uji beban statis, keseragaman kondisi tanah, dan ketelitian program penyelidikan tanah. Nilai-nilai tipikal faktor aman untuk tiang bor yang disarankan, ditunjukkan dalam Tabel . Nilai-nilai dalam tabel tersebut berlaku untuk bangunan-bangunan pada umumnya. Untuk bangunan-bangunan yang khusus, maka nilai-nilai faktor amannya dapat ditambah atau dikurangi.

Tabel 9. Faktor Aman

Informasi dalam perancangan			Faktor aman (F)	
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

Pada umumnya, faktor aman untuk beban tarik lebih besar dari beban tekan. Hal ini, dikarenakan keruntuhan akibat beban tarik lebih bersifat segera dan merusakkan terutama pada saat gempa.

I. Tiang Kelompok (*Pile Group*)

Pada umumnya jarang pondasi *bored pile* digunakan sebagai tiang tunggal, melainkan berupa gabungan dari beberapa tiang yang disebut dengan tiang kelompok (*pile group*). 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.

J. Kapasitas Kelompok Tiang dan Efisiensi *Bored Pile*

1. Kapasitas Kelompok Tiang

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. Kemampuan tanah di sekitar dan di bawah kelompok tiang untuk mendukung beban total struktur.

b. Pengaruh konsolidasi tanah yang terletak di bawah kelompok tiang.

Pada tiang tunggal, interaksi yang terjadi hanyalah tiang dengan tanah, sedangkan pada kelompok tiang akan ada interaksi antara tiang dengan tanah dan tiang dengan tiang yang lainnya. Interaksi ini akan lebih besar jika jarak tiang semakin dekat. Jika pada salah satu tiang pada kelompok tiang didesak sehingga terjadi penurunan, maka tiang disekitarnya akan ikut turun akibat tertarik oleh tanah disekitar tiang yang dibebani. Berdasarkan kondisi tersebut, maka akan terjadi penurunan tiang akibat beban yang didukung tiang didekatnya walaupun tiang tersebut tidak terbebani. Hal ini akan mengakibatkan kapasitas dukung tiang menjadi berkurang jika dibandingkan dengan kondisi tiang tunggal. Analisis ini dikembangkan dengan menganggap tidak ada *pile cap*.

2. Efisiensi *Bored Pile*

Efisiensi *Bored Pile* 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:

$$E_g = 1 - \theta \frac{(n'-1)m + (m-1)n'}{90mn'} \dots\dots\dots(24)$$

Keterangan:

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:

$$E_g = \frac{Q_g}{nQ_u} \dots\dots\dots(25)$$

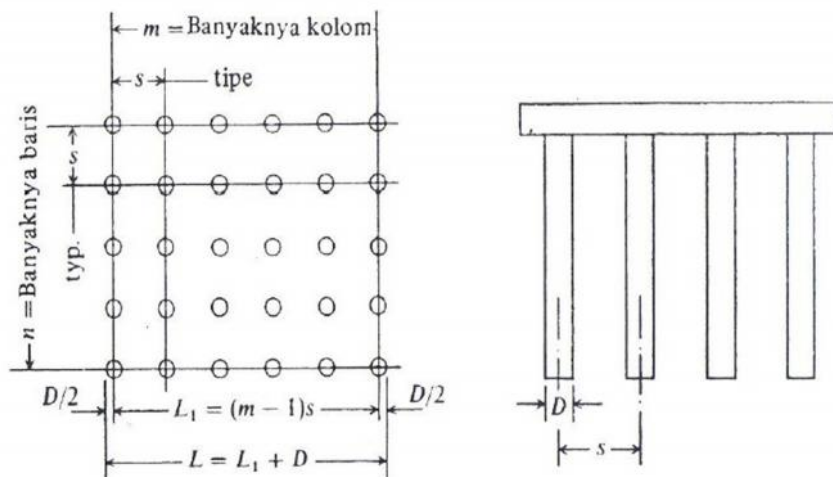
Dengan:

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



Gambar 6. Efisiensi Kelompok Tiang

3. Kapasitas Izin Kelompok Tiang

Kapasitas izin kelompok tiang menggunakan persamaan:

$$Q_g = E_g \times n \times Q_u \dots\dots\dots(26)$$

K. 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:

$$P = \frac{V}{n} \pm \frac{M_y x_i}{\sum x^2} \pm \frac{M_x y_i}{\sum y^2} \dots\dots\dots(27)$$

Keterangan:

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. Daya Dukung Lateral

Pondasi *bored pile* terkadang harus menahan beban lateral (horizontal) seperti beban angin, beban gempa dan tekanan tanah lateral. Beban-beban tersebut akan bekerja pada ujung atas kepala tiang. Hal ini menyebabkan kepala tiang terdeformasi lateral. Hal ini menimbulkan gaya geser pada tiang dan tiang akan melentur. Gaya lateral yang paling mempengaruhi daya dukung lateral pada pondasi adalah gaya akibat tekanan tanah. Jika gaya lateral yang harus didukung tiang sangat besar, maka dapat digunakan tiang miring.

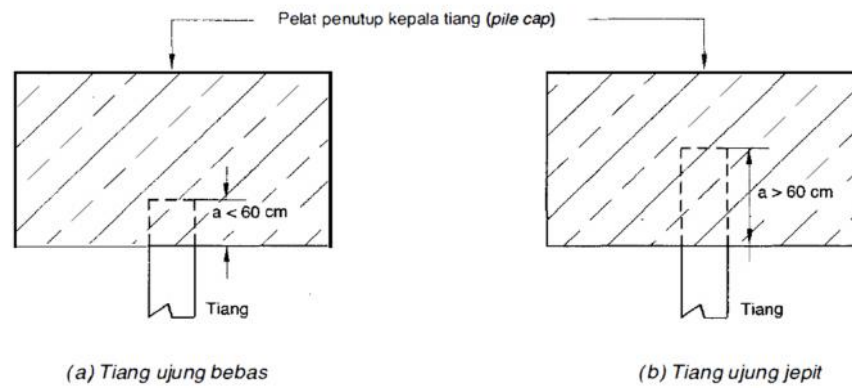
Dalam analisis gaya lateral, tiang-tiang perlu dibedakan menurut model ikatannya dengan pelat penutup tiang. Model ikatan tersebut sangat mempengaruhi kelakuan tiang dalam mendukung beban lateral. Tiang-tiang dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu:

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

Definisi tiang ujung jepit (*fixed end pile*) menurut McNulty adalah tiang yang ujung atasnya terjepit (tertanam) dalam pelat penutup kepala tiang paling sedikit sedalam 60 cm (24 inch)

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

Tiang ujung bebas adalah tiang yang bagian atasnya tidak terjepit atau terjepit kedalam pelat penutup kepala tiang tetapi kurang dari 60 cm.



Gambar 7. Definisi tiang ujung jepit dan ujung bebas

McNulty (1956) menyarankan perpindahan lateral ijin pada bangunan gedung adalah 6 mm (Hardiyatmo, 2010).

1. Penentuan Kriteria Tiang Panjang dan Tiang Pendek

Untuk menghitung daya dukung lateral, perlu diketahui jenis tiang pondasi, yaitu tiang pendek dan panjang. Kriteria tiang pendek dan panjang ditentukan berdasarkan kekakuan relatif R atau T.

$$I_p = \frac{1}{12} \times b \times h^3 \dots\dots\dots(28)$$

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p \times I_p}{\eta h}} \dots\dots\dots(29)$$

Dimana:

E_p = Modulus elastis tiang (kN/m^2)

I_p = Momen inersia tiang

h = Koefisien variasi modulus

Tabel 10. Kriteria Tiang Pendek dan Panjang

Jenis Tiang	Modulus Tanah	
Kaku (Pendek)	L 2T	L 2R
Elastis (Panjang)	L 4T	L 0,35 R

Sumber : Hardiyatmo, 2010

2. Daya Dukung Lateral Tiang Tunggal

Hasil penelitian Poulos menjelaskan bahwa defleksi maksimum terjadi pada permukaan tanah. Defleksi tersebut diakibatkan adanya beban horisontal dan momen yang terjadi pada kepala tiang. Daya dukung lateral tiang tunggal dihitung dengan metode Broms (Hardiyatmo, 2010)

a. Tiang ujung bebas

$$f = H_u / (9C_u d) \dots\dots\dots(30)$$

$$M_{mak} = H_u (e + 3d/2 + 1/2 f) \dots\dots\dots(31)$$

Momen maksimum dapat pula dinyatakan oleh persamaan:

$$M_{mak} = (9/4) d g^2 C_u \dots\dots\dots(32)$$

Dengan $L = 3d/2 + f + g$, maka H_u dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 37 dan 38. Nilai-nilai H_u yang diplot dalam grafik hubungan L/d dan $H_u/C_u d^2$, ditunjukkan pada Gambar 8a. Grafik tersebut berlaku untuk tiang pendek apabila $M_y > M_{mak}$, dan untuk tiang panjang $M_y < M_{mak}$, maka H_u dapat diperoleh dari persamaan 37 dan 38. Penyelesaian dari persamaan yang diperoleh, digambarkan dalam hubungan antara $M_y/C_u d^3$ dan $H_u/C_u d^2$ ditunjukkan dalam Gambar 8.

b. Tiang ujung jepit

Untuk tiang panjang dihitung dengan persamaan:

$$H_u = \frac{2 M_Y}{\frac{3d}{2} + \frac{f}{2}} \dots\dots\dots(33)$$

Untuk tiang pendek dihitung dengan persamaan:

$$H_u = 9c_u d(L - 3d/2) \dots\dots\dots(34)$$

$$M_{mak} = H_u (L/2 + 3d/4) \dots\dots\dots(35)$$

$$M_y = (9/4) c_u d g^2 - 9c_u d f(3d/2 + f/2) \dots\dots\dots(36)$$

Keterangan:

H_u = Daya dukung lateral

M_y = Tahanan momen tiang

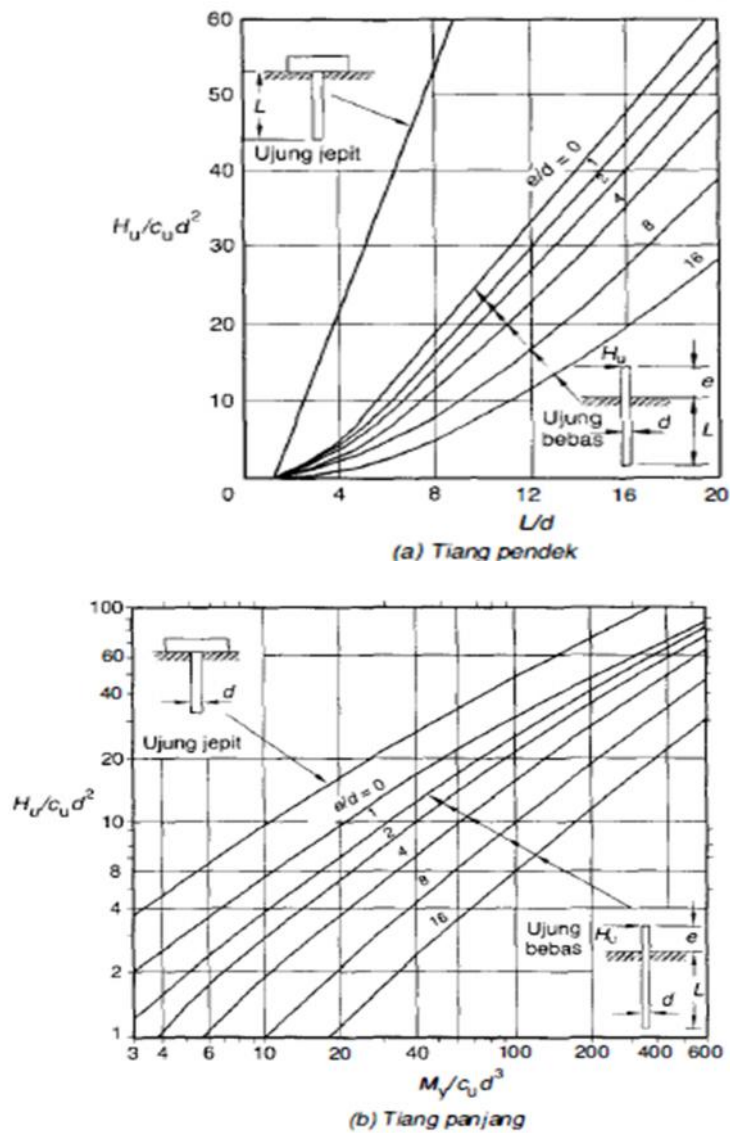
M_{mak} = Momen (negatif) pada kepala tiang

L = Kedalaman pondasi

d = Diameter pondasi

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

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



Gambar 8. Tahanan Lateral Ultimit Tiang dalam Tanah Kohesif (Hardiyatmo, 2010)

3. Daya Dukung Lateral Kelompok Tiang

Daya dukung kelompok tiang dirumuskan sebagai berikut:

$$H_g = \sum_{j=i}^n H_u \dots \dots \dots (37)$$

Keterangan:

H_g = Beban lateral kelompok tiang (kN)

H_u = Beban lateral tiang tunggal (kN)

n = Jumlah tiang

4. Defleksi Kelompok Tiang

Nilai defleksi kelompok tiang dihitung dirumuskan sebagai berikut:

$$y_o = \frac{H (e+zf)^3}{12 E_p I_p} \dots\dots\dots(38)$$

Dimana:

y_o = Defleksi tiang

e = Jarak beban terhadap muka tanah

zf = Jarak titik jepit dari muka tanah

H = Beban lateral

M. Penurunan (*Settlement*)

Di atas kelompok tiang (*pile group*), biasanya diletakkan suatu konstruksi *poer* yang kaku yang mempersatukan kelompok tiang tersebut. Dengan *poer* yang kokoh ini diharapkan terjadi *settlement* yang merata apabila kelompok tiang tersebut dibebani secara merata.

Problem utama dalam menghitung penurunan kelompok tiang, antara lain:

1. Dalam memprediksi besarnya tegangan di dalam tanah akibat beban tiang dan sifat-sifat tanah yang berada di bawah ujung tiang.
2. Dalam menentukan besarnya beban yang di dukung oleh masing-masing tiang di dalam kelompoknya dan beban aksial yang terjadi di sepanjang tiang-tiang tersebut, untuk menghitung perpendekan tiang.

1. Penurunan pada Tiang Tunggal (Sholeh, 2008)

Rumus perhitungan penurunan tiang tunggal:

$$S = S1 + S2 + S3 \dots\dots\dots (39)$$

$$S1 = \frac{(Qb + \alpha Qs)L}{Ab Ep} \dots\dots\dots (40)$$

Keterangan:

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

$$S2 = \frac{Cp \times Qb}{D \times qp} \dots\dots\dots (41)$$

Keterangan:

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

Cp = Koefisien empiris

D = Diameter tiang

Qp = Daya dukung batas ujung tiang

Tabel 11. 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

$$S_3 = \left(\frac{Q_b}{p \times L} \right) \times \frac{D}{E_s} \times (1 - \mu_s^2) \times I_{ws} \dots \dots \dots (42)$$

Keterangan:

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:

$$I_{ws} = 2 + 0,35 \sqrt{\frac{L}{D}} \dots \dots \dots (43)$$

Tabel 12. Angka Poisson (μ)

Jenis Tanah	
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 (tergantung dari jenisnya)	0,1 – 0,4
<i>Loose</i>	0,1 – 0,3

Sumber : Hardiyatmo, 2010

Tabel 13. Modulus Elastis 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
Serpil	140000 - 1400000

Sumber : Hardiyatmo, 2010

2. Penurunan pada Tiang Kelompok

Menurut Vesic (Sholeh, 2008) hubungan penurunan antara tiang tunggal dan kelompok tiang:

$$S_g = S \sqrt{\frac{B_g}{D_s}} \dots\dots\dots(44)$$

Keterangan:

S_g = Penurunan kelompok tiang (m)

B = Lebar kelompok tiang (m)

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

D = Diameter tiang (m)