

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Uraian Umum

LRT atau *Light Rail Transit* merupakan proyek pembangunan prasarana transportasi massal yang diharapkan dapat menjadi pemutus mata rantai permasalahan transportasi yang ada di Indonesia, khususnya Ibukota DKI Jakarta. Tingkat kepadatan penduduk yang sangat tinggi ditambah dengan rasio kesibukan yang juga tinggi berbanding lurus dengan kebutuhan infrastruktur transportasi yang dituntut semakin berkembang. Sehingga diharapkan sarana transportasi yang ada dapat mengimbangi tingkat populasi yang kian bertambah.

Dalam rangka mendukung dan memenuhi kebutuhan tersebut, diperlukan sistem transportasi massal / *public transportation system* yang efektif, efisien dan terintegrasi agar dapat menekan penggunaan kendaraan pribadi sehingga dapat menurunkan angka kemacetan. Berdasarkan Peraturan Presiden no 98 tahun 2015 pasal 2, pemerintah menugaskan PT. Adhi Karya untuk membangun prasarana Kereta Api Ringan / *Light Rail Transit (LRT)* terintegrasi dengan jalur lintasan yang menghubungkan Jakarta – Depok – Bekasi – Bogor.

Ada 6 Lintas Pelayanan yang akan dibangun dengan total panjang 81,6 KM, diantaranya :

1. Cawang – Cibubur : 14,3 KM
2. Cawang – Kuningan – Dukuh Atas : 10,5 KM
3. Cawang – Bekasi Timur : 18,3 KM
4. Dukuh Atas – Palmerah – Senayan : 7,8 KM
5. Cibubur – Bogor : 25,0 KM
6. Palmerah – Grogol : 5,7 KM

Lingkup pekerjaan yang akan dilaksanakan adalah konstruksi jalan layang, stasiun dan sistem operasi. Pada konstruksi jalan layang ruas Cawang – TMII direncanakan ada 245 titik *pier* dengan jarak 30 meter (struktur normal) dari tiap – tiap *pier*. Secara umum urutan pekerjaannya adalah pekerjaan *Sub Structure* (pondasi, pekerjaan lantai kerja, pekerjaan *pilecap*, pekerjaan *pier*) dan *Upper Structure* (pekerjaan *pierhead*, dan pekerjaan *u-shape girder*).

## **2.2. Bangunan Bawah (*Sub Structure*)**

Bangunan bawah jembatan adalah bagian konstruksi jembatan yang menahan beban dari bangunan atas jembatan dan menyalurkannya ke pondasi yang kemudian disalurkan menuju tanah dasar. Ditinjau dari konstruksinya, struktur bawah jembatan terdiri dari :

### 1. Pondasi

Pondasi jembatan merupakan konstruksi jembatan yang terletak paling bawah dan berfungsi menerima beban dan meneruskannya ke lapisan tanah keras yang diperhitungkan cukup kuat menahannya.

### 2. *Pilecap*

*Pilecap* merupakan bagian dari struktur bawah bangunan yang berfungsi sebagai pengikat tiang pancang atau *bored pile* yang sudah tertanam sehingga dapat menjadi satu kesatuan dan dapat menyalurkan beban secara merata tidak hanya kepada satu tiang pancang atau *bored pile* saja. *Pilecap* juga berfungsi sebagai penahan gaya geser terhadap beban yang ada.

### 3. *Abutment* atau *footing*

*Abutment* atau *footing* adalah suatu konstruksi jembatan yang terdapat pada ujung – ujung jembatan yang berfungsi sebagai penahan beban dari bangunan atas dan meneruskannya ke pondasi.

### 4. *Pier* atau Pilar

*Pier* atau Pilar adalah salah satu konstruksi bangunan bawah jembatan yang terletak diantara dua *abutment* yang juga berfungsi sebagai penahan beban bangunan atas dan meneruskannya ke pondasi.

## 2.3. Pondasi

Pondasi adalah suatu bagian dari konstruksi bangunan yang bertugas meletakkan bangunan dan meneruskan beban bangunan atas (*upper structure* /

*super structure*) ke dasar tanah yang cukup kuat mendukungnya. Untuk tujuan itu pondasi bangunan harus diperhitungkan dan 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 (Gunawan, 1991).

Suatu perencanaan pondasi dikatakan benar apabila beban yang diteruskan oleh pondasi ke tanah tidak melampaui kekuatan tanah yang bersangkutan. Apabila kekuatan tanah dilampaui, maka penurunan yang berlebihan atau keruntuhan dari tanah akan terjadi ( Das, 1998 ).

Dalam perencanaan pondasi untuk suatu konstruksi dapat digunakan beberapa macam tipe pondasi. Pemilihan tipe pondasi menurut Sardjono (1988) didasarkan atas :

1. Fungsi bangunan atas (*upper structure*) yang akan dipikul oleh pondasi tersebut.
2. Besarnya beban dan beratnya bangunan atas.
3. Keadaan tanah dimana bangunan tersebut akan didirikan.
4. Biaya pondasi dibandingkan dengan bangunan atas.

### **2.3.1. Macam – Macam Pondasi**

Menurut Gunawan (1991), pondasi bangunan biasa dibedakan sebagai pondasi dangkal (*shallow foudations*) dan pondasi dalam (*Deep Foundations*),

tergantung dari perbandingan kedalaman pondasi dan lebar pondasi, dan secara umum digunakan patokan :

1. Jika kedalaman dasar pondasi dari muka tanah adalah kurang atau sama dengan lebar pondasi ( $D \leq B$ ) maka disebut pondasi dangkal.
2. Jika kedalaman pondasi dari muka tanah adalah lebih dari lima kali lebar pondasi ( $D < 5B$ ) maka disebut pondasi dalam.

Kedalaman suatu pondasi menentukan jenis pondasi apa yang akan digunakan. Berdasarkan tingkat kedalaman pemancangan pondasi pada kedalaman tanah, maka pondasi dapat dibagi menjadi dua (Hardiyatmo,2002), yaitu :

1. Pondasi Dangkal (*shallow foudations*)

Pondasi dangkal ialah pondasi yang mendukung beban secara langsung, seperti :

**a.** Pondasi memanjang

Pondasi memanjang adalah pondasi yang digunakan untuk mendukung dinding memanjang atau digunakan untuk mendukung sederhana kolom yang berjarak dekat sehingga bila dipakai pondasi telapak sisi – sisinya akan berimpit satu sama lain (Gambar 2.1a).

**b.** Pondasi telapak

Pondasi telapak merupakan pondasi yang berdiri sendiri dalam mendukung kolom (Gambar 2.1b).

**c.** Pondasi rakit (*raft foundation*)

Pondasi rakit merupakan pondasi yang digunakan untuk mendukung bangunan yang terletak pada tanah lunak atau digunakan bila susunan kolom – kolom jaraknya sedemikian dekat disemua arahnya, sehingga bila dipakai pondasi telapak, sisi – sisinya berimpit satu sama lain. Jenis pondasi ini umumnya berlaku untuk tanah yang mempunyai daya dukung tanah yang sangat kecil (Gambar 2.1c).

## 2. Pondasi dalam (*Deep Foundation*)

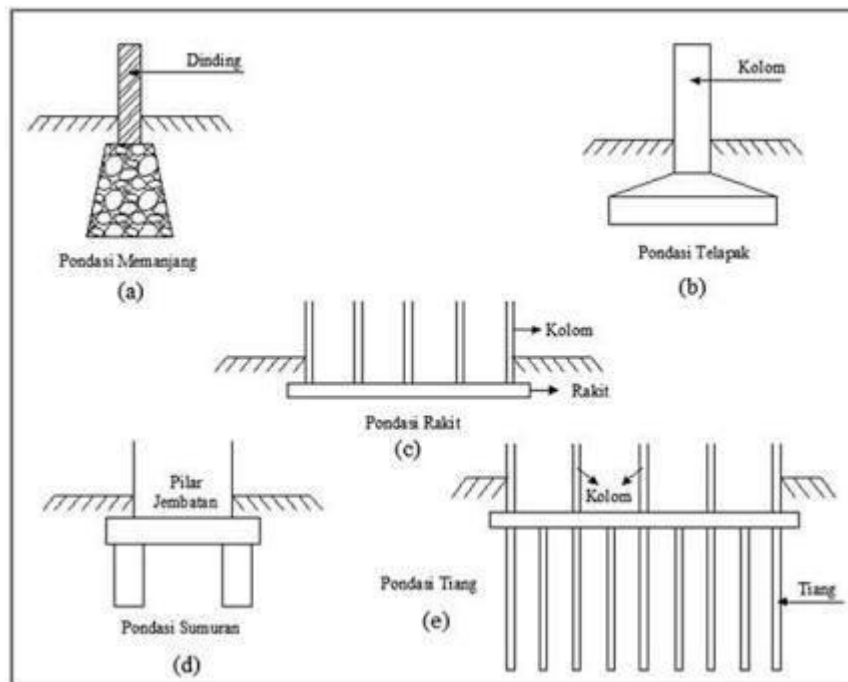
Pondasi dalam ialah pondasi yang meneruskan beban bangunan ke tanah keras yang terletak pada kedalaman yang sangat dalam, seperti :

### a. Pondasi sumuran (*pier foundation*)

Pondasi ini merupakan peralihan antar pondasi dangkal dan pondasi dalam, digunakan bila tanah dasar yang kuat terletak pada kedalaman yang relatif dalam, dimana pondasi sumuran nilai kedalaman ( $D_f$ ) dibagi lebarnya ( $B$ ) lebih besar dari 4 sedangkan pondasi dangkal  $D_f/B \leq 1$  (Gambar 2.1d).

### b. Pondasi tiang (*Pile Foundation*)

Pondasi tiang digunakan bila tanah pondasi pada kedalaman yang normal tidak mampu mendukung bebannya dan tanah kerasnya terletak pada kedalaman yang sangat dalam. Pondasi tiang umumnya berdiameter lebih kecil dan lebih panjang dibandingkan dengan pondasi sumuran (Bowles 1991), (Gambar 2.1e).



**Gambar 2.1** Macam – Macam Pondasi (Hardiyatmo, 2002)

## 2.4. Pondasi Tiang

### 2.4.1. Definisi Pondasi Tiang

Pondasi tiang adalah bagian konstruksi yang dibuat dari kayu, beton dan / atau baja, yang digunakan untuk meneruskan (mentransmisikan) beban permukaan ke tingkat permukaan yang lebih rendah dalam massa tanah. Beban terdistribusi sebagai beban vertikal dari beban sepanjang poros tiang pancang atau pemakaian beban secara langsung terhadap lapisan yang lebih rendah melalui ujung tiang pancang (Bowles, 1991).

Pondasi tiang adalah suatu konstruksi pondasi yang mampu menahan gaya *orthogonal* ke sumbu tiang dengan jalan menyerap lenturan. Pondasi tiang dibuat menjadi satu kesatuan yang monolit dengan menyatukan pangkal tiang

pancang yang terdapat di bawah konstruksi dengan tumpuan pondasi. (Sosrodarsono dan Nakazawa, 2000).

Pondasi tiang digunakan bila tanah pondasi pada kedalaman yang normal tidak mampu mendukung bebannya dan tanah kerasnya terletak pada kedalaman yang sangat dalam. Pondasi tiang umumnya berdiameter lebih kecil dan lebih panjang dibandingkan dengan pondasi sumuran (Bowles 1991).

#### **2.4.2. Klasifikasi Pondasi Tiang**

Berdasarkan metode instalasinya, pondasi tiang pada umumnya dapat diklasifikasikan atas (Hardiyatmo,2010) :

1. Tiang Pancang (*Driven Pile*)

Tiang yang dipasang dengan cara membuat bahan berbentuk bulat atau bujur sangkar memanjang yang dicekat lebih dulu kemudian dipancang dan ditekan ke dalam tanah.

2. Tiang Bor (*Drilled Shaft*)

Tiang yang dipasang dengan cara mengebor tanah lebih dulu sampai kedalaman tertentu, kemudian tulangan baja dimasukkan ke dalam lubang bor dan kemudian diisi / dicor dengan beton.

3. Kaison (*Caisson*)

Kaison merupakan suatu bentuk kotak atau silinder telah dicetak lebih dulu, dimasukkan ke dalam tanah, pada kedalaman tertentu kemudian diisi beton, kadang – kadang kaison juga disebut tiang bor yang berdiameter/



lebar besar, sehingga kadang – kadang membingungkan dalam penyebutan.

## **2.5. Pondasi Tiang Pancang**

### **2.5.1. Definisi Pondasi Tiang Pancang**

Tiang pancang adalah bagian – bagian konstruksi yang dibuat dari kayu, beton, dan atau baja, yang digunakan untuk (mentransmisikan) beban – beban permukaan ke tingkat – tingkat permukaan yang lebih rendah dalam massa tanah. Hal ini merupakan distribusi vertikal dari beban sepanjang poros tiang pancang atau pemakaian beban secara langsung terhadap lapisan yang lebih rendah melalui ujung tiang pancang. Distribusi muatan vertikal dibuat dengan menggunakan sebuah gesekan, atau tiang pancang "apung", sedangkan pemakaian beban secara langsung dibuat oleh sebuah titik ujung, atau tiang panjang ini semata – mata hanya dari segi kemudahan karena semua tiang pancang berfungsi sebagai kombinasi tahanan samping dan dukungan ujung kecuali bila tiang pancang menembus tanah yang sangat lembek sampai ke dasar padat (Bowles,1991).

### **2.5.2. Keunggulan Pondasi Tiang Pancang**

Menurut Bowles (1991), pada umumnya kegunaan tiang pancang adalah :

1. Untuk membawa beban – beban konstruksi di atas tanah, ke dalam atau melalui sebuah lapisan tanah. Di dalam hal ini beban vertikal dan beban lateral dapat terlihat.
2. Untuk menahan gaya desakan ke atas, atau gaya guling, seperti untuk telapak ruangan bawah tanah di bawah bidang batas air jenuh atau untuk menopang kaki – kaki menara terhadap guling.
3. Memampatkan endapan tak berkohesi yang bebas lepas melalui kombinasi perpindahan isi tiang pancang dan getaran dorongan. Tiang pancang ini dapat ditarik keluar kemudian.
4. Sebagai faktor keamanan tambahan di bawah tumpuan jembatan dan / atau *pier* (tiang), khususnya jika erosi merupakan persoalan yang potensial.
5. Dalam konstruksi lepas pantai, untuk meneruskan beban – beban di atas permukaan air melalui air dan ke dalam tanah yang mendasari air tersebut. Hal seperti ini adalah mengenai tiang pancang yang ditanamkan sebagian dan yang terpengaruh baik oleh beban vertikal maupun beban lateral.

### **2.5.3. Pemilihan Jenis Pondasi Tiang Pancang**

Pemilihan tiang pancang untuk berbagai jenis keadaan tergantung pada banyak jenis variabel walaupun demikian harus ada indikator yang jelas yang dapat menunjukkan kesesuaian beberapa tiang pancang dengan kondisi – kondisi tertentu (Sardjono,1988).

Faktor – faktor yang perlu dipertimbangkan di dalam pemilihan tiang pancang antara lain :

1. Tipe dari tanah dasar yang meliputi jenis tanah dasar dan ciri – ciri topografinya.
2. Jenis bangunan yang akan dibuat.
3. Alasan teknis pada waktu pelaksanaan pemancangan.

#### **2.5.4. Jenis - Jenis Pondasi Tiang Pancang**

Pada perencanaan pondasi, pemilihan jenis pondasi tiang pancang untuk berbagai jenis keadaan tergantung pada banyak variabel. Faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan di dalam pemilihan tiang pancang antara lain tipe dari tanah dasar yang meliputi jenis tanah dasar dan ciri – ciri topografinya, alasan teknis pada waktu pelaksanaan pemancangan dan jenis bangunan yang akan dibangun.

##### **a. Pondasi Tiang Pancang Berdasarkan Cara Pemindahan Beban yang Diterima Tiang ke dalam Tanah**

Menurut cara pemindahan beban, tiang pancang (Hardiyatmo, 2002) dibagi dua yaitu :

1. *Point bearing pile (end bearing pile)* atau tiang pancang dengan tahanan ujung. Tiang ini meneruskan beban melalui tahanan ujung ke lapisan tanah keras yang mampu memikul beban yang diterima oleh tiang tersebut. Lapisan tanah keras itu dapat berupa lempung keras sampai pada batu – batuan yang sangat keras.

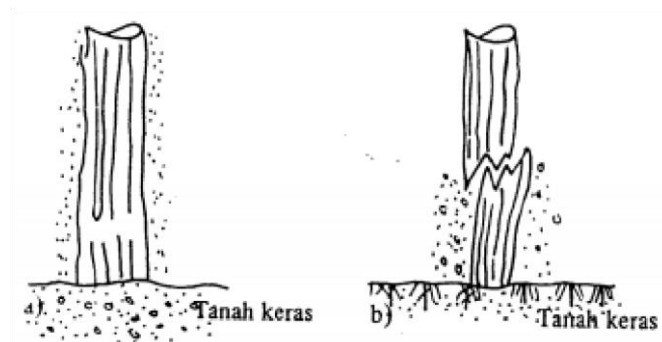
2. *Friction pile* (tiang pancang yang bertahan dengan pelekatan antara tiang dengan tanah)

#### b. Pondasi Tiang Pancang Berdasarkan Bahan yang digunakan

Menurut bahan yang digunakan tiang pancang dibagi menjadi enam (Hardiyatmo, 2010) yaitu :

##### 1. Tiang pancang Kayu

Tiang kayu adalah tiang yang dibuat dari kayu, umumnya berdiameter antara 10 – 25 cm. Beban maksimum yang dapat dipikul oleh tiang kayu tunggal dapat mencapai 270 – 300 KN.



**Gambar 2.2** Tiang Pancang Kayu (Sardjono,1988)

##### 2. Tiang Pancang Beton Pracetak

Tiang beton pracetak yaitu tiang yang terbuat dari beton yang dicetak di suatu tempat dan diangkut ke lokasi rencana bangunan.

##### 3. Tiang Beton Cetak Di tempat

##### 4. Tiang Bor

Tiang bor dipasang kedalam tanah dengan cara mengebor tanah terlebih dahulu, baru kemudian dimasukkan tulangan yang telah dirangkai dan

cor beton. Pada tanah yang keras atau batuan lunak, dasar tiang dapat dibesarkan untuk menambah tahanan dukung ujung tiang.

#### 5. Tiang Baja Profil

Tiang baja profil termasuk tiang pancang dengan bahan yang dibuat dari baja profil. Tiang baja profil berbentuk profil H, empat persegi panjang, segi enam dan lain – lainnya.

#### 6. Tiang Komposit

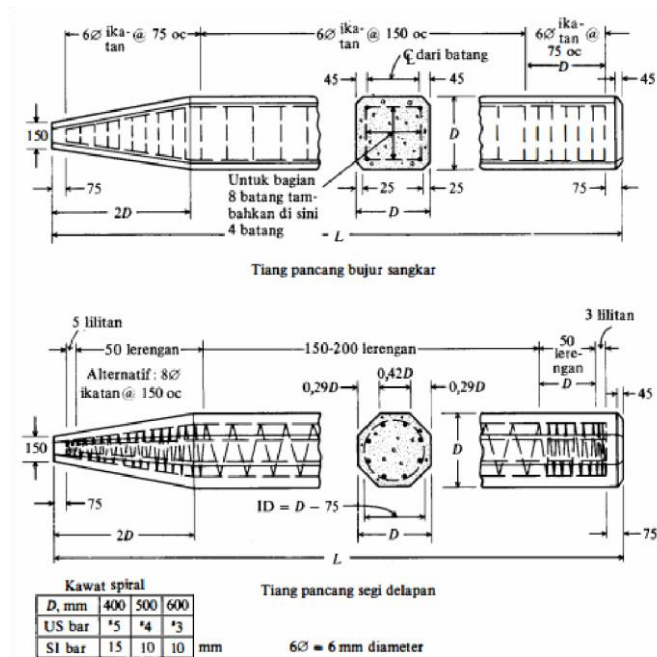
Beberapa kombinasi bahan tiang pancang atau tiang bor dengan tiang pancang dapat digunakan untuk mengatasi masalah – masalah pada kondisi tanah tertentu.

### c. Jenis Pondasi Tiang Berdasarkan Cara Pembuatan

#### 1. *Precast Reinforced Concrete Pile*

*Precast Reinforced Concrete Pile* adalah tiang pancang dari beton bertulang yang dicetak dan dicor dalam acuan beton (bekisting), kemudian setelah cukup kuat lalu diangkat dan dipancangkan. (Sardjono,1988).

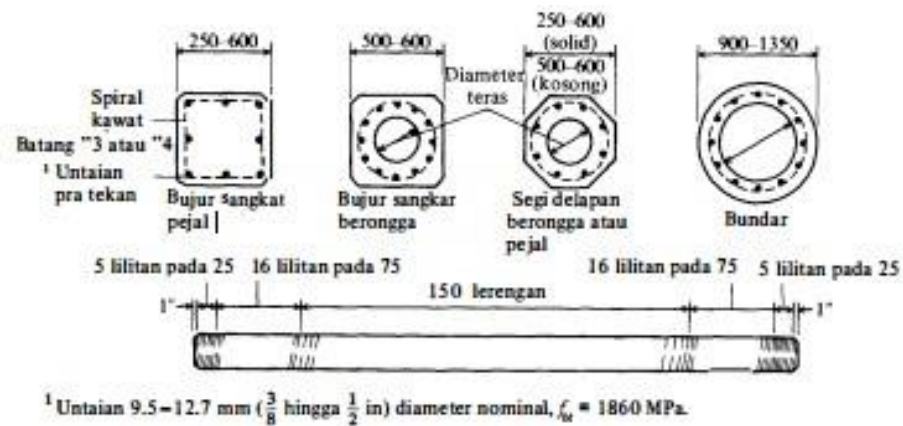
Tiang pancang ini dapat memikul beban yang besar (> 50 ton untuk setiap tiang), hal ini tergantung dari dimensinya. Dalam perencanaan tiang pancang beton precast ini, panjang tiang harus dihitung dengan teliti, sebab kalau ternyata panjang dari tiang ini kurang, terpaksa harus dilakukan penyambungan, hal ini akan banyak memakan waktu dan juga biaya (Sardjono,1988).



**Gambar 2.3** *Precast Reinforced Concrete Pile* (Bowles,1991)

## 2. *Precast Prestressed Concrete Pile*

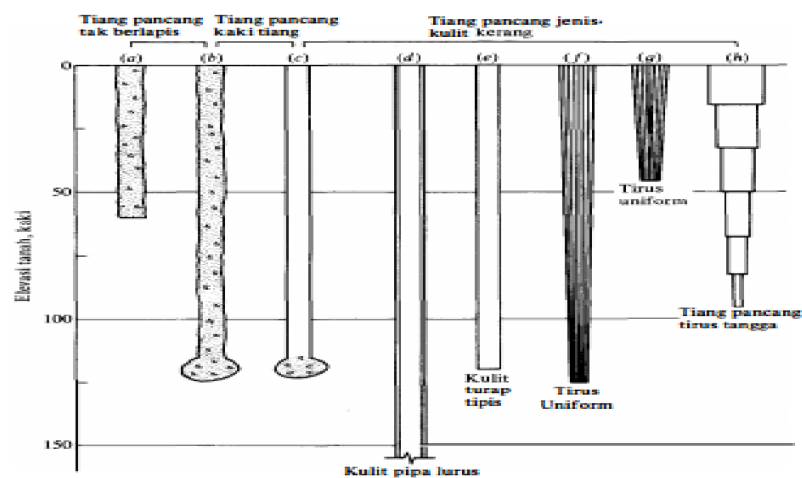
*Precast Prestressed Concrete Pile* adalah tiang pancang dari beton yang dalam pelaksanaan pencetakannya sama seperti pembuatan beton *prestress*, yaitu dengan menarik besi tulangnya ketika dicor dan dilepaskan setelah beton mengeras. Untuk tiang pancang jenis ini biasanya dibuat oleh pabrik yang khusus membuat tiang pancang, untuk ukuran dan panjangnya dapat dipesan langsung sesuai dengan yang diperlukan.



Gambar 2.4 Tiang Pancang *Prestressed Concrete Pile* (Bowles,1991)

### 3. *Cast In Place*

Pondasi tiang pancang tipe ini adalah pondasi yang dicetak di tempat dengan cara membuat lubang terlebih dahulu dalam tanah dengan cara mengebor tanah seperti pada pengeboran tanah pada waktu penyelidikan tanah (Sardjono,1988).



Gambar 2.5 Jenis Tiang Beton yang dicor di tempat (Bowles, 1991)

## **2.6. Pondasi Tiang *Bored Pile***

### **2.6.1. Definisi Pondasi *Bored Pile***

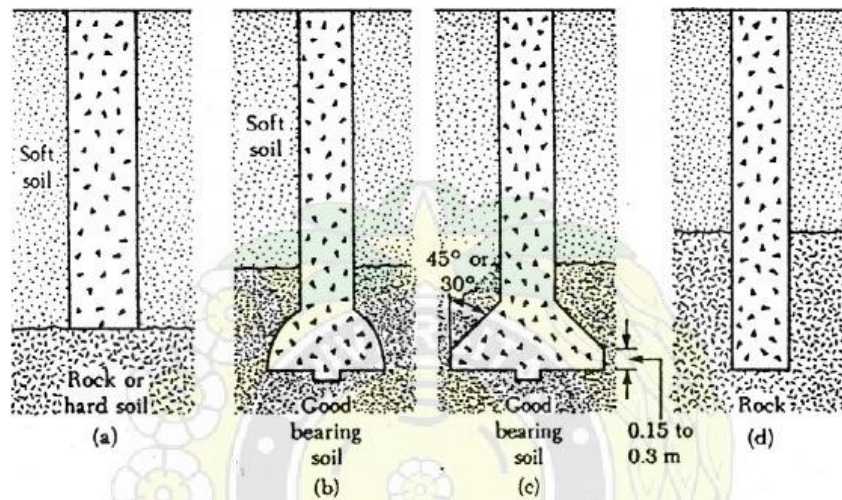
Pondasi *bored pile* adalah pondasi tiang yang pemasangannya dilakukan dengan mengebor tanah lebih dahulu (Hary Christiady Hardiyatmo, 2010). Pemasangan pondasi *bored pile* ke dalam tanah dilakukan dengan cara mengebor terlebih dahulu, kemudian diisi tulangan yang telah dirangkai dan dicor beton. Apabila 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.

### **2.6.2. Jenis Pondasi *Bored Pile***

Menurut (Braja M. Das, 1941), pondasi bored pile mempunyai empat jenis, diantaranya :

1. *Bored pile* lurus untuk tanah keras
2. *Bored pile* yang ujungnya diperbesar berbentuk bel
3. *Bored pile* yang ujungnya diperbesar berbentuk trapesium
4. *Bored pile* lurus untuk tanah batu – batuan





**Gambar 2.6** Jenis – Jenis Pondasi *Bored Pile* (Braja M. Dias, 1941)

### 2.6.3. Keunggulan dan Kelemahan Penggunaan Pondasi *Bored Pile*

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

- Pemasangan tidak menimbulkan gangguan suara dan getaran yang membahayakan bangunan sekitarnya.
- Kedalaman tiang dapat divariasikan.
- *Bored pile* dapat dipasang menembus batuan, sedangkan tiang pancang akan kesulitan bila pemancangan menembus lapisan batuan.
- Diameter tiang memungkinkan dibuat besar, bila perlu ujung bawah tiang dapat dibuat lebih besar guna mempertinggi kapasitas dukungnya.

Adapun beberapa kelemahan dari pondasi *bored pile*, diantaranya :

- Kondisi cuaca yang tidak stabil dapat mempengaruhi pekerjaan pengeboran dan pengecoran.
- Pengeboran dapat mempengaruhi kepadatan tanah.
- Mempunyai tingkat longsor (*ground loss*) yang sangat tinggi.
- Membutuhkan material beton yang cukup banyak, penggunaan pondasi *bored pile* dinilai lebih boros.

## 2.7. Penyelidikan Tanah

Uji penyelidikan tanah adalah kegiatan untuk mengetahui daya dukung dan karakteristik tanah serta kondisi geologi, seperti mengetahui susunan lapisan tanah / sifat tanah, mengetahui kekuatan lapisan tanah dalam rangka penyelidikan tanah dasar untuk keperluan pondasi bangunan, jalan dan lain – lain, kepadatan dan daya dukung tanah serta mengetahui sifat korosivitas tanah. Penyelidikan tanah dilakukan untuk mengetahui jenis pondasi yang akan digunakan untuk konstruksi bangunan, selain itu dari hasil penyelidikan tanah dapat ditentukan perlakuan terhadap tanah agar daya dukung dapat mendukung konstruksi yang akan dibangun. Dari hasil penyelidikan tanah ini akan dipilih alternatif / jenis, kedalaman serta dimensi pondasi yang paling ekonomis tetapi masih aman ([www.testindo.com/article/70/uji-penyelidikan-tanah](http://www.testindo.com/article/70/uji-penyelidikan-tanah)).

Agar bangunan dapat berdiri dengan stabil dan tidak timbul penurunan (*settlement*) yang terlalu besar, maka pondasi bangunan harus mencapai lapisan

tanah yang cukup padat. Untuk mengetahui letak / kedalaman lapisan tanah padat dan kapasitas daya dukung tanah (*bearing capacity*), dilakukan kegiatan penyelidikan di lapangan (lokasi rencana bangunan baru) dan penelitian di laboratorium (Gunawan, 1991). Penyelidikan tanah untuk perancangan pondasi terdiri dari beberapa macam, meliputi :

1. Penyelidikan di Laboratorium (*Laboratory Test*)
2. Penyelidikan di lapangan (*Standart Penetration Test*)
3. *State Cone Penetration Test* atau uji sondir

#### **2.7.1. Penyelidikan Tanah di Laboratorium (*Laboratory Test*)**

Pengujian di laboratorium menggunakan *sample* tanah yang telah di ambil pada pekerjaan *core drilling* yaitu *undisturb sample* / contoh tanah tidak terganggu. Uji laboratorium dilakukan untuk mengetahui sifat dan karakteristik tanah ([www.testindo.com/article/70/uji-penyelidikan-tanah](http://www.testindo.com/article/70/uji-penyelidikan-tanah)).

Secara umum, pengujian di laboratorium yang sering dilakukan untuk perencanaan pondasi menurut Hardiyatmo (2002) adalah:

- a. Pengujian dari pengamatan langsung
- b. Pemeriksaan kadar air
- c. Analisis butiran
- d. Pengujian Batas plastis dan batas cair (*Atteberg Limits*)

- e. Uji triaksial
- f. Uji tekan bebas
- g. Uji geser kipas
- h. Uji konsolidasi
- i. Uji permeabilitas
- j. Analisa bahan kimia

### **2.7.2. *Standart Penetration Test (SPT)***

*Standard Penetration Test (SPT)* sering digunakan untuk mendapatkan daya dukung tanah secara langsung di lokasi. Tujuan dari percobaan SPT ini adalah untuk menentukan kepadatan relatif lapisan tanah dari pengambilan contoh tanah dengan tabung sehingga diketahui jenis tanah dan ketebalan tiap-tiap lapisan kedalaman tanah dan untuk memperoleh data yang kualitatif pada perlawanan penetrasi tanah serta menetapkan kepadatan dari tanah yang tidak berkoheksi yang biasa sulit diambil sampelnya.

### **2.7.3. *Static Cone Penetration Test* atau Uji Sondir**

Uji penetrasi kerucut statis atau uji sondir sangat berguna untuk memperoleh variasi kepadatan tanah pasir yang tidak padat. Nilai – nilai tahanan kerucut statis, atau tahanan konus ( $q_c$ ) yang diperoleh dari pengujian, dapat dikorelasikan secara langsung dengan kapasitas dukung tanah dan penurunan pada pondasi (Hardiyatmo, 2010).

## 2.8. Kapasitas Dukung Pondasi Tiang

Kuat dukung pondasi tiang adalah kemampuan tiang pancang untuk meneruskan beban yang bekerja terhadap lapisan tanah (Hardiyatmo, 1985).

Berbagai metode dalam usaha menentukan kapasitas dukung tiang ini, tapi umumnya dibedakan dalam dua kategori yaitu untuk tiang tunggal (*single pile*) dan kelompok tiang (*pile group*).

### 2.8.1. Kapasitas Daya Dukung Aksial Tunggal (*Single Pile*)

Daya dukung *single pile* adalah daya dukung persatu tiang pancang. Untuk menentukan nilai kapasitas daya dukung tiang aksial tunggal (*single pile*), dapat digunakan beberapa metode perhitungan, diantaranya :

#### 1. Kapasitas Daya Dukung Pondasi berdasarkan hasil Uji Laboratorium (Sifat dan Karakteristik Tanah)

Kapasitas ultimit *netto* tiang tunggal ( $Q_u$ ) adalah jumlah tahanan ujung bawah tiang ( $Q_b$ ) dan tahanan gesek ultimit ( $Q_s$ ) antara dinding tiang dan tanah di sekitarnya dikurangi dengan berat sendiri tiang (Hardiyatmo, 2002), bila dinyatakan dengan persamaan adalah:

$$Q_u = Q_b + Q_s - W_p \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana :

$Q_u$  = Kapasitas dukung ultimit netto (kN)

$Q_b$  = Tahanan ujung bawah ultimit (kN)

$Q_s$  = Tahanan gesek ultimit (kN)

$W_p$  = Berat sendiri tiang (kN)

Tahanan ujung (*end bearing*) ultimit secara pendekatan dapat dihitung menggunakan persamaan kapasitas dukung pondasi dangkal.

$$q_u = \frac{Q_b}{A_b} = c_b \cdot N_c + p_b \cdot N_q + 0,5 \cdot D \cdot \gamma \cdot N_\gamma \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

$q_u$  = tahanan ujung per satuan luas tiang (kN/m<sup>2</sup>)

$Q_b$  = tahanan ujung ultimit tiang (kN)

$A_b$  = luas penampang bawah tiang (m<sup>2</sup>)

$c_b$  = kohesi diujung tiang (kN/m<sup>2</sup>)

$p_b$  =  $z \cdot \gamma$  = tekanan *overburden* pada ujung tiang (kN/m<sup>2</sup>)

$D$  = diameter tiang (m)

$\gamma$  = berat volume tanah (kN/m<sup>3</sup>)

$N_c, N_q, N_\gamma$  = faktor kapasitas dukung tiang (fungsi dari  $\phi$ )

Dari persamaan (2.2), tahanan ujung ultimit ( $Q_b$ ) dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$Q_b = A_b \cdot [c_b \cdot N_c + p_b \cdot N_q + 0,5 \cdot D \cdot \gamma \cdot N_\gamma] \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

Tahanan gesek ultimit dapat menggunakan persamaan menurut *Coulumb*, yaitu :

$$\tau_d = \frac{Q_s}{A_s} = c_d + \sigma_n \cdot \text{Tg } \varphi_d \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

- $\tau_d$  = tahanan geser tiang (kN)
- $c_d$  = kohesi antara dinding dengan tanah (kN/m<sup>2</sup>)
- $\sigma_n$  = tegangan normal pada sisi tiang (kN/m<sup>2</sup>)
- $\varphi_d$  = sudut gesek antara sisi tiang dengan tanah (°)

Besarnya tegangan normal pada sisi tiang ( $\sigma_n$ ) atau tegangan horizontal pada tiang ( $\sigma_h$ ), tergantung pada koefisien tekanan tanah lateral (k).

$$k = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \text{ atau } \sigma_h = k \cdot \sigma_v \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

- $\sigma_h$  = tegangan horisontal atau lateral dari tanah di sekitar tiang (kN/m<sup>2</sup>)
- $\sigma_v$  = tegangan vertikal akibat berat tanah (kN/m<sup>2</sup>)

Pada persamaan (2.5), tegangan horisontal  $\sigma_h$  sama dengan tegangan normal  $\sigma_n$  yang bekerja tegak lurus dengan sisi tiang. Dengan demikian notasi baru untuk koefisien tekanan tanah lateral (k) diganti menjadi koefisien tekanan tanah lateral pada sisi tiang ( $k_d$ ), maka persamaan (2.5) menjadi :

$$\sigma_h = \sigma_n = k_d \cdot p_o \dots\dots\dots(2.6)$$

Dengan  $p_o = \sum z \cdot \gamma =$  tekanan *overburden* rata - rata di sepanjang tiang  
( $\text{kN/m}^2$ ),  $z =$  kedalaman dari muka tanah (m).

Dari kedua persamaan (2.4) dan (2.6), maka diperoleh persamaan (2.7) :

$$\tau_d = \frac{Q_s}{A_s} = c_d + k_d \cdot p_o \cdot \text{tg } \varphi_d \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

Jadi persamaan untuk tahanan gesek ultimit tiang ( $Q_s$ ) adalah :

$$Q_s = \sum A_s \cdot [c_d + k_d \cdot p_o \cdot \text{tg } \varphi_d] \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana :

$A_s =$  luas selimut tiang ( $\text{m}^2$ ) = keliling penampang tiang  
dikalikan dengan panjang tiang.

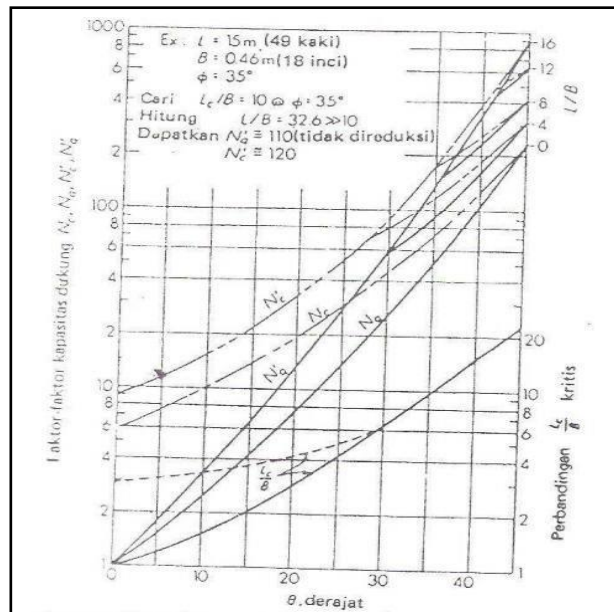
$\varphi_d = \delta =$  sudut gesek antara dinding dengan tanah ( $^\circ$ )

Dengan demikian dapat diperoleh persamaan umum untuk menghitung  
kapasitas daya dukung ultimit tiang tunggal, yaitu :

$$Q_u = A_b [c_b \cdot N_c + p_b \cdot N_q + 0,5 \cdot D \cdot \gamma \cdot N_\gamma] + \sum A_s [c_d + k_d \cdot p_o \cdot \text{tg } \varphi_d] - W_p \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

Untuk nilai  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$  disini menggunakan grafik berdasarkan metode  
Meyerhof (1976) (gambar 2.7)





**Gambar 2.7** Faktor Kapasitas Dukung Tanah Meyerhof (1976)

Nilai  $k_d$  untuk tiang pada tanah granuler diperoleh dari Mansur dan Hunter (1970) (Tabel 2.1).

Bahan Tiang	Kd
Tiang baja H	1,4 - 1,9
Tiang pipa baja	1,0 - 1,3
Tiang beton pracetak	1,45 - 1,6
uji tarik tiang (8 tiang) untuk seluruh tipe tiang	0,4 - 0,9

**Tabel 2.1** Nilai  $k_d$  untuk Tanah Granuler (Mansur dan Hunter, 1970)

Aas (1966) mengusulkan nilai-nilai  $\delta$  yang dapat digunakan dalam menghitung tahanan gesek seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.2. Pada

tabel ini bahan tiang yang terbuat dari beton dan kayu, nilai  $\delta$  ditentukan dari hubungan sudut gesek dari hubungan sudut gesek dalam efektif tanah ( $\phi'$ ).

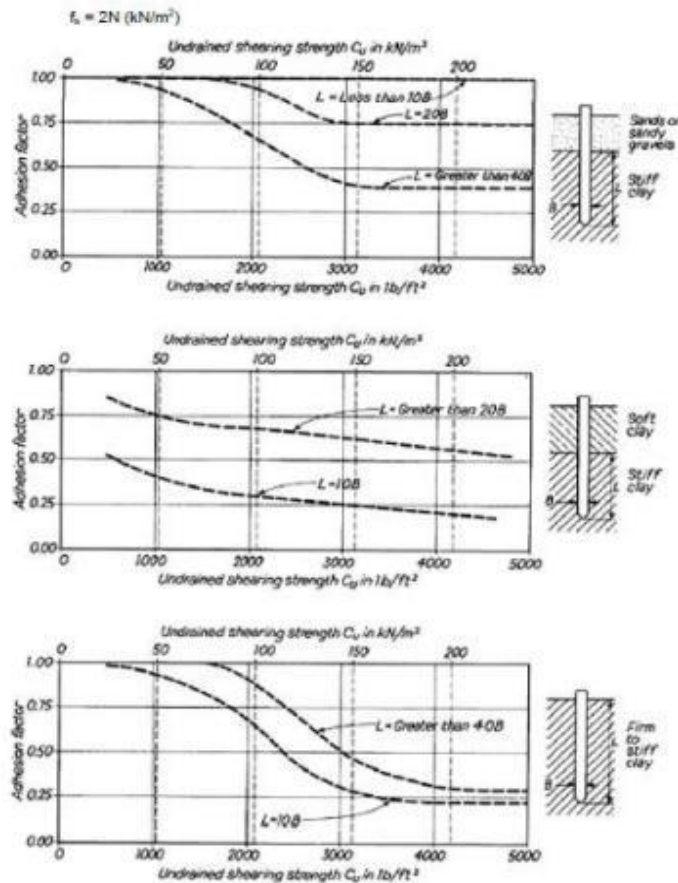
Bahan Tiang	$\delta = \phi'$
Baja	20°
Beton	0,75 $\phi'$
Kayu	0,66 $\phi'$

**Tabel 2.2** Sudut Gesek antara Dinding Tiang dan Tanah Granuler ( $\delta$ ), Aas (1966).

Nilai adhesi ultimit untuk tiang pancang dalam tanah lempung berdasarkan Tomlinson, 1963 (tabel 2.3) dan dapat juga dicari berdasarkan Tomlinson, 1977 (gambar 2.8).

Bahan Tiang	Kohesi $C_u$ (k/ft <sup>2</sup> )	Adhesi Ultimit $C_d$ (k/ft <sup>2</sup> )
Beton dan Kayu	0 - 0,75	0 - 0,70
	0,75 - 1,50	0,70 - 1,00
	1,50 - 3,00	1,00 - 1,30
Baja	0 - 0,75	0 - 0,70
	0,75 - 1,50	0,70 - 1,00
	1,50 - 3,00	1,00 - 1,20

**Tabel 2.3** Adhesi Ultimit  $c_d$  (Tomlinson, 1997)



**Gambar 2.8** Faktor Adhesi antara tiang dengan tanah ( $\alpha$ )

## 2. Kapasitas Daya Dukung Pondasi dari Data *Standart Penetration Test* (SPT)

*Standard Penetration Test* (SPT) adalah sejenis percobaan dinamis dengan memasukkan suatu alat yang dinamakan *split spoon* ke dalam tanah. Dengan percobaan ini akan diperoleh kepadatan relatif (*relative density*), sudut geser tanah ( $\phi$ ) berdasarkan nilai jumlah pukulan ( $N$ ).

Harga  $N$  yang diperoleh dari SPT tersebut diperlukan untuk memperhitungkan daya dukung tanah. Daya dukung tanah tergantung pada kuat geser tanah. Hipotesis pertama mengenai kuat geser tanah diuraikan oleh Coulomb yang dinyatakan dengan:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana :

$\tau$  = kekuatan geser tanah ( $\text{kg/m}^2$ )

$c$  = kohesi tanah ( $\text{kg/m}^2$ )

$\sigma$  = tegangan normal yang terjadi pada tanah ( $\text{kg/m}^2$ )

$\varphi$  = sudut geser tanah ( $^\circ$ )

Untuk mendapatkan sudut geser tanah dari tanah tidak kohesif (pasir) biasanya dapat dipergunakan rumus Dunham (1962) sebagai berikut:

1. Tanah berpasir berbentuk bulat dengan gradasi seragam, atau butiran pasir bersegi – segi dengan gradasi tidak seragam, mempunyai sudut geser sebesar :

$$\varphi = 12N + 15 \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

2. Butiran pasir bersegi dengan gradasi seragam, maka sudut gesernya adalah :

$$\varphi = 0,3N + 27 \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

Angka penetrasi sangat berguna sebagai pedoman dalam eksplorasi tanah dan untuk memperkirakan kondisi lapisan tanah. Hubungan antara

kepadatan relatif, sudut geser tanah dan nilai N dari pasir dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Angka Penetrasi Standart N	Kepadatan Relatif Dr (%)	Sudut Geser Dalam, $\phi$ (°)
0 – 5	0 – 5	26 – 30
5 – 10	5 – 30	28 – 35
10 – 30	30 – 60	35 – 42
30 – 50	60 – 65	38 – 48

**Tabel 2.4** Hubungan Kepadatan Relatif, Sudut Geser Tanah dan Nilai N (Das, 1985)

Pada tanah tidak kohesif daya dukung sebanding dengan berat isi tanah, hal ini berarti bahwa tinggi muka air tanah banyak mempengaruhi daya dukung pasir. Tanah dibawah air mempunyai berat isi efektif yang kira-kira setengah berat isi tanah diatas muka air. Tanah dapat dikatakan mempunyai daya dukung yang baik, dapat diliat dari ketentuan berikut :

1. Lapisan kohesif mempunyai nilai SPT,  $N > 35$ .
2. Lapisan kohesif mempunyai harga kuat tekan ( $q_u$ )  $3 - 4 \text{ kg/m}^2$ , atau harga SPT,  $N > 15$ .

Hasil percobaan pada SPT ini hanya merupakan perkiraan kasar, jadi bukan merupakan nilai yang teliti. Dalam pelaksanaan umumnya hasil sondir lebih dapat dipercaya dari pada percobaan SPT. Perlu menjadi

catatan bagi kita bahwa jumlah pukulan untuk 15 cm pertama yang dinilai

$N_1$  tidak dihitung karena permukaan tanah dianggap sudah terganggu.

Untuk perencanaan kapasitas daya dukung tanah dari data SPT, daya dukung tiang pancang dapat dihitung berdasarkan jenis tanah dan berdasarkan rumus empiris dari metode Meyerhof.

1. Daya dukung tiang pancang dari jenis tanah dapat di bagi menjadi dua yaitu berdasarkan tanah non kohesif dan tanah kohesif.

a. Tanah Non Kohesif

Daya dukung ujung pondasi ( $Q_b$ ) pada tanah non kohesif, diperoleh dari persamaan :

$$Q_b = 40 \times N - SPT \times \frac{L_b}{D} \times A_p < 400 \times N - SPT \times A_p \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

Tahanan geser selimut tiang pancang ( $Q_s$ ) pada tanah non-kohesif diperoleh dari persamaan :

$$Q_s = 2 \times N - SPT \times p \times L_i \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana :

$N - SPT$  =  $N$  yang telah dikoreksi,

$L_b$  = panjang tiang (m)

$D$  = diameter tiang (m)

$L_i$  = panjang lapisan tanah (m)

$p$  = keliling tiang (m)

$A_p$  = luas penampang tiang ( $m^2$ )

b. Tanah Kohesif

Daya dukung ujung pondasi ( $Q_p$ ) pada tanah kohesif diperoleh dari persamaan :

$$Q_p = 9 \times C_u \times A_p \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

Tahanan geser selimut tiang pancang ( $Q_s$ ) pada tanah kohesif diperoleh dari persamaan :

$$Q_s = \alpha \times C_u \times p \times L_i \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana :

$\alpha$  = faktor adhesi antara tanah dan tiang

$L_i$  = panjang lapisan tanah (m)

$P$  = keliling tiang (m)

$A_p$  = luas penampang tiang ( $m^2$ )

$C_u$  = kohesi *undrained* ( $kN/m^2$ )

$$= 2/3 \times N - SPT \times 10$$

2. Daya dukung pondasi berdasarkan rumus empiris menggunakan metode Meyerhof.

$$Q_u = Q_b + Q_s \quad \dots\dots\dots(2.17)$$

a) Tiang Beton

$$Q_u = 40 \times N_b \times A_b + \frac{1}{5} \times \bar{N} \times A_s \quad \dots\dots\dots(2.18)$$

## b) Tiang Baja

$$Q_u = 40 \times N_b \times A_b + \frac{1}{10} \times \bar{N} \times A \quad \dots\dots\dots(2.19)$$

Dimana :

$Q_u$  = kapasitas ultimit tiang (ton)

$Q_b$  = tahanan ujung tiang (ton)

$Q_s$  = tahanan gesek tiang (ton)

$A_b$  = luas dasar tiang ( $m^2$ )

$A_s$  = luas selimut tiang ( $m^2$ )

$N_b$  = nilai N dari hasil uji SPT pada tanah sekitar dasar tiang

= nilai rata – rata dari 8d di atas dasar tiang sampai 4d di bawah tiang

$\bar{N}$  = nilai N rata – rata uji SPT disepanjang tiang

### 3. Kapasitas Dukung Aksial Tiang dengan Metode Skempton

- **Tahanan Ujung Ultimit (*End Bearing Resistance*) ( $Q_b$ )**

Tahanan ujung satuan tiang *bored pile* ( $f_b$ ) menurut Skempton (1966)

dinyatakan oleh persamaan :

$$f_b = \mu \times c_b \times N_c$$

Tahanan ujung ultimit :

$$Q_b = A_b \times f_b$$

atau



$$Q_b = A_b \times \mu \times c_b \times N_c$$

Dimana,

$Q_b$  = tahanan ujung ultimit (kN)

$\mu$  = faktor koreksi, dengan  $\mu = 0,8$  untuk  $d < 1\text{m}$ , dan  $\mu = 0,75$  untuk  $d \geq 1\text{m}$

$A_b$  = Luas penampang ujung bawah tiang ( $\text{m}^2$ )

$c_b$  = Kohesi tanah di bawah ujung tiang pada kondisi tak terdrainase (*undrained*) ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )

$N_c$  = Faktor kapasitas dukung ( $N_c = 9$ )

Untuk menghitung tahanan ujung, Skempton (1966) menyarankan faktor kapasitas dukung  $N_c = 9$ . Kedalam penembusan tiang *bored pile* pada lapisan pendukung disarankan paling sedikit 5 kali diameter tiang. Jika tanah termasuk jenis tanah lempung retak – retak, maka  $C_b$  nilai minimumnya.

- **Tahanan Gesek Ultimit (*Skin Friction*) ( $Q_s$ )**

Tahanan gesek tiang *bored pile* dinyatakan oleh persamaan :

$$Q_s = A_s \times f_s$$

$$f_s = c_d = \alpha \times c_u$$

dengan,

$A_s$  = luas selimut tiang ( $\text{m}^2$ )

$f_s$  = tahanan gesek per satuan luas ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )

$c_d$  = adhesi ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )

$\alpha$  = faktor adhesi

$c_u$  = kohesi tak terdrainase (*undrained*) (kN/m<sup>2</sup>)

Untuk menghitung tahanan gesek sisi tiang bor, Skempton (1966) menyarankan faktor adhesi  $\alpha = 0,45$ . Dengan demikian, persamaan tahanan gesek sisi tiang bor, menjadi :

$$Q_s = 0,45 \times c_u \times A_s$$

Faktor adhesi pada tiang *bored pile* yang ujung bawahnya dibesarkan dapat diambil lebih kecil. Hal ini karena waktu pelaksanaan pekerjaannya yang lebih lama. Umumnya, tiang *bore pile* harus segera dicor sesudah pengeboran. Air yang dipakai untuk membantu proses pengeboran mengakibatkan penurunan faktor adhesi.

- **Kapasitas Dukung Ultimit ( $Q_u$ )**

Kapasitas dukung ultimit tiang *bored pile* dinyatakan oleh persamaan:

$$Q_u = Q_b + Q_s$$

Dengan substitusi  $Q_b$  dan  $Q_s$ , akan diperoleh :

$$Q_u = A_b \times \mu \times c_b \times N_c + 0,45 \times c_u \times A_s$$

### 2.8.2. Kapasitas Daya Dukung Aksial Kelompok Tiang (*Pile Group*)

Pada keadaan sebenarnya jarang sekali kita dapatkan tiang pancang yang berdiri sendiri (*Single Pile*), akan tetapi kita sering mendapatkan pondasi tiang pancang yang umumnya dipasang secara berkelompok (*Pile Group*) (Sardjono, 1988).

Yang dimaksud berkelompok adalah gabungan dari beberapa tiang yang dipasang secara relatif berdekatan dan biasanya diikat menjadi satu bagian atasnya dengan menggunakan *pilecap*. Dalam perhitungan *pilecap* (*poer*) dianggap atau dibuat kaku sempurna (Sardjono, 1988), sehingga :

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

Untuk menghitung besarnya kapasitas dukung kelompok tiang, ada beberapa hal yang harus diperhatikan terlebih dahulu, yaitu jumlah tiang dalam satu kelompok, jarak tiang, dan efisiensi kelompok tiang :

### 1. Jumlah Tiang (n)

Untuk menentukan jumlah tiang yang akan dipasang didasarkan beban yang bekerja pada fondasi dan kapasitas dukung ijin tiang, maka rumus yang dipakai adalah sebagai berikut ini.

$$n = \frac{P}{Qa} \dots\dots\dots(2.20)$$

Dimana :

P = Beban yang bekerja (kN)

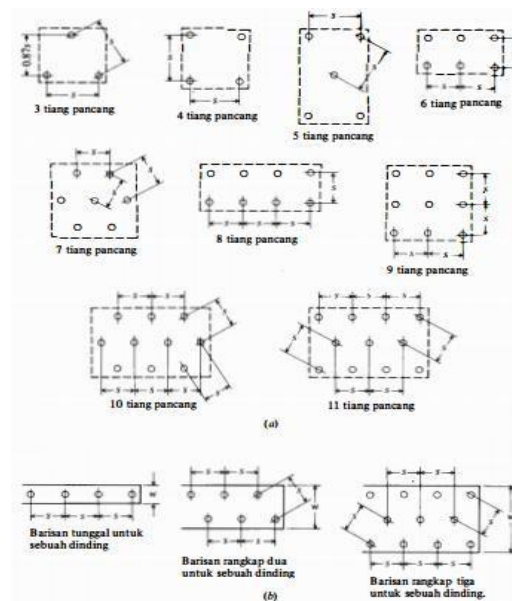
Qa = Kapasitas dukung ijin tiang tunggal (kN)

## **2. Jarak Tiang (s)**

Jarak antar tiang pancang di dalam kelompok tiang sangat mempengaruhi perhitungan kapasitas dukung dari kelompok tiang tersebut. Untuk bekerja sebagai kelompok tiang, jarak antar tiang yang dipakai adalah menurut peraturan – peraturan bangunan pada daerah masing – masing. Pada prinsipnya jarak tiang (s) makin rapat, ukuran *pilecap* makin kecil dan secara tidak langsung biaya lebih murah. Tetapi bila pondasi memikul beban momen maka jarak tiang perlu diperbesar yang berarti menambah atau memperbesar tahanan momen (K. Basah Suryolelono 1994).

## **3. Susunan Tiang**

Susunan tiang sangat berpengaruh terhadap luas denah *pilecap*, yang secara tidak langsung tergantung dari jarak tiang. Bila jarak tiang kurang teratur atau terlalu lebar, maka luas denah *pilecap* akan bertambah besar dan berakibat volume beton menjadi bertambah besar sehingga biaya konstruksi membengkak (K. Basah Suryolelono, 1994).



**Gambar 2.9** Contoh Susunan Tiang (Bowles, 1991)

#### 4. Efisiensi Kelompok Tiang

Menurut Coduto (1983), efisiensi tiang bergantung pada beberapa faktor, yaitu :

- Jumlah, panjang, diameter, susunan dan jarak tiang.
- Model transfer beban (tahanan gesek terhadap tahanan dukung ujung).
- Prosedur pelaksanaan pemasangan tiang.
- Urutan pemasangan tiang.
- Macam tanah.
- Waktu setelah pemasangan.
- Interaksi antara pelat penutup tiang (*pilecap*) dengan tanah.
- Arah dari beban yang bekerja.

Persamaan untuk menghitung efisiensi kelompok tiang adalah sebagai berikut :

**a) Converse – Lebarre**

$$E_g = 1 - \Theta \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90mn} \dots\dots\dots(2.21)$$

Dimana :

$E_g$  = Efisiensi kelompok tiang

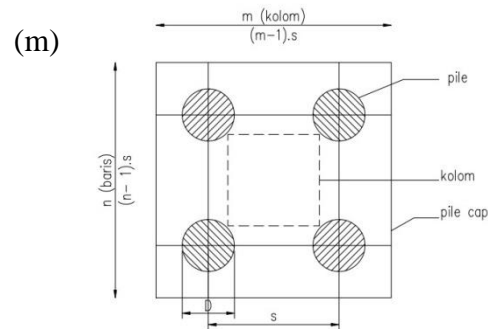
$\Theta$  = arc tg d/s (°)

m = Jumlah baris tiang

n = Jumlah tiang dalam satu baris

d = Diameter tiang (m)

s = Jarak pusat ke pusat tiang



**Gambar 2.10** Baris Tiang Kelompok

**b) Los Angeles Group – Action Formula**

$$E_g = 1 - \frac{D}{\pi.S.m} [m.(n-1) + \sqrt{2(m-1)(n-1)}] \dots\dots\dots(2.22)$$

Dimana :

$E_g$  = Efisiensi kelompok tiang

$m$  = Jumlah baris tiang

$n$  = Jumlah tiang dalam satu baris

$D$  = Diameter tiang (m)

$s$  = Jarak pusat ke pusat tiang (m)

Kapasitas ultimit kelompok tiang dengan memperlihatkan faktor efisiensi tiang yang dinyatakan dengan rumus sebagai berikut :

$$Q_g = E_g \cdot n \cdot Q_a \quad \dots\dots\dots(2.23)$$

Dimana :

$Q_g$  = Kapasitas ultimit kelompok tiang (KN)

$E_g$  = Efisiensi kelompok tiang

$n$  = Jumlah tiang dalam kelompok

$Q_a$  = Kapasitas dukung ijin tiang (KN)

## 2.9. Faktor Keamanan

Untuk memperoleh kapasitas ijin tiang, maka diperlukan untuk membagi kapasitas ultimit tiang dengan faktor aman tertentu. Faktor aman ini perlu diberikan dengan maksud :

1. Untuk memberikan keamanan terhadap ketidakpastian metode hitungan yang digunakan.
2. Untuk memberikan keamanan terhadap variasi kuat geser dan kompresibilitas tanah.
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 meyakinkan bahwa penurunan tidak seragam di antara tiang – tiang masih dalam batas – batas toleransi.

Besarnya beban bekerja (*working load*) atau kapasitas tiang izin dengan memperhatikan keamanan terhadap keruntuhan adalah nilai kapasitas ultimit ( $Q_u$ ) dibagi dengan faktor aman (FS) yang sesuai. Variasi besarnya faktor aman yang telah banyak digunakan untuk perancangan pondasi tiang, tergantung pada jenis tiang dan tanah berdasarkan data laboratorium sebagai berikut:

$$Q_a = \frac{Q_u}{SF} \dots\dots\dots(2.24)$$



Klasifikasi Struktur	Faktor Keamanan ( <i>Safety Factor</i> )			
	Kontrol Baik	Kontrol Normal	Kontrol Jelek	Kontrol Sangat Jelek
Monumental	2,3	3	3,5	4
Permanen	2	2,8	2,8	3,4
Sementara	1,4	3	2,3	2,8

**Tabel 2.5** Faktor Keamanan (*Safety Factor*) yang Disarankan (Hardiyatmo, 2002)