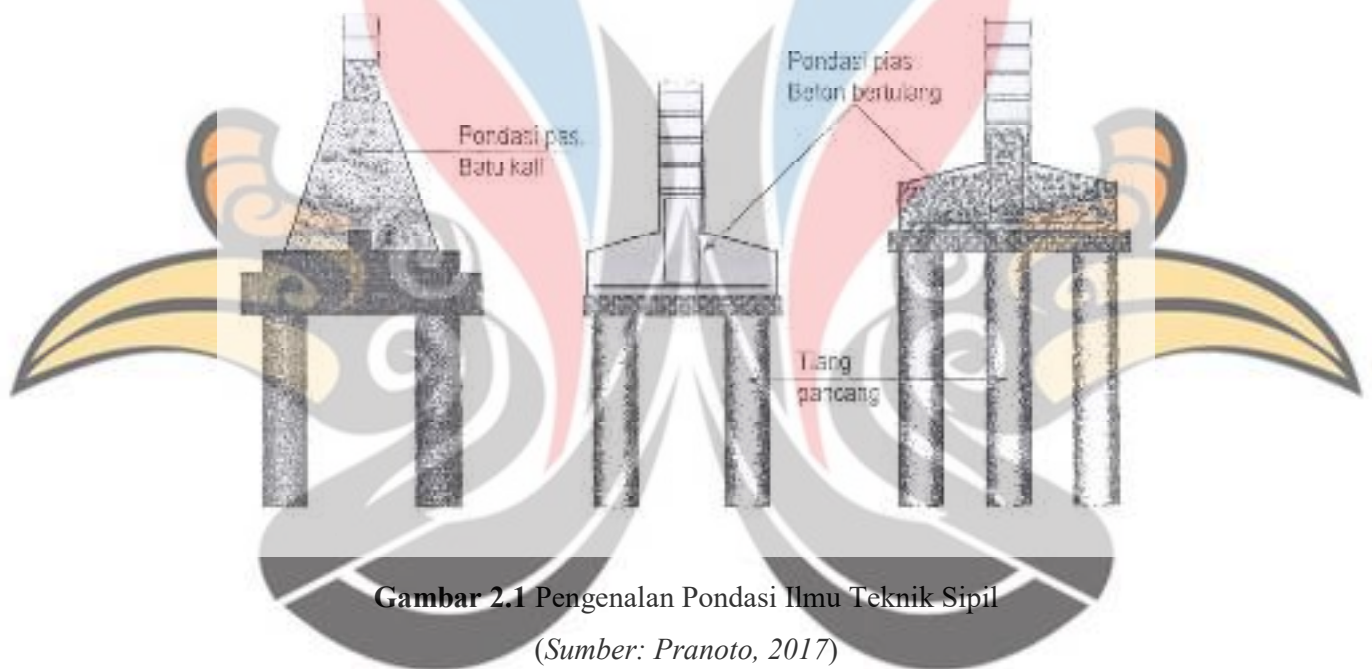


## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Pondasi

Pondasi adalah suatu bagian dari konstruksi bangunan yang berfungsi meneruskan beban struktur di atasnya ke lapisan tanah di bawahnya. Beban struktur atas tersebut harus ditransfer menuju lapisan tanah yang cukup keras agar pondasi mampu memikul beban tersebut.



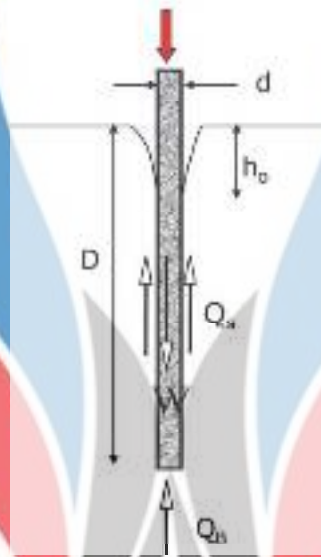
Gambar 2.1 Pengenalan Pondasi Ilmu Teknik Sipil

(Sumber: Pranoto, 2017)

#### 2.2 Pondasi Dalam

Pondasi dalam atau pondasi tiang adalah jenis pondasi yang sangat sering digunakan apabila daya dukung tanah tidak cukup untuk menahan beban pondasi pada permukaan tanah. Penggunaan pondasi tiang, beban dapat ditahan pada lapisan tanah yang dalam dengan kekuatan lebih besar. Lapisan tersebut adalah lapisan batuan keras. Pondasi tiang juga dapat digunakan untuk menahan gaya horizontal atau gaya tarik. Umumnya pondasi tiang dianggap menjadi dua macam yaitu tiang tahan ujung (*end bearing pile*) dan tiang gesekan (*friction pile*). Tiang

tahanan ujung dimasukan hingga lapisan tanah keras sehingga daya dukungnya bergantung pada kekuatan lapisan tanah keras tersebut. Tiang gesekan tidak mencapai lapisan tanah keras, dimana daya dukungnya bergantung pada tahanan gesekan (*skin friction*) antara tiang dan tanah. Pada pondasi dalam, istilah hambatan pelekat (*shaft adhesion*) juga dipakai untuk tahanan ini.



**Gambar 2.2** Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Tunggal  
(Sumber: Pranoto, 2017)

a. Tumpuan Ujung (*Point Bearing*)

Tiang-tiang yang dimasukkan sampai lapisan tanah keras teoritis dianggap bahwa seluruh beban tiang dipindahkan ke lapisan tanah keras melalui ujung tiang. Lapisan tanah keras yang dimaksud sebenarnya agak relatif dan tergantung atas beberapa faktor, antara lain besarnya beban yang harus dipikul oleh tiang. Sebagai acuan untuk dapat disebut sebagai lapisan pendukung yang baik, maka dapat digunakan ketentuan

1. Lapisan non kohesif (pasir, kerikil) mempunyai harga *standard penetration test* sebesar  $N > 35$ .
2. Lapisan kohesif mempunyai harga kuat tekan bebas (*unconfined compression strength*)  $q_u$  3 sampai  $4 \text{ kg/cm}^2$  atau kira-kira  $N > 15$  sampai 20.

Hal yang perlu diperhatikan pada *point bearing* adalah apabila dibawah lapisan pendukung terdapat lapisan lunak, sedangkan ketebalan lapisan pendukung sendiri

tipis sehingga penurunan perlu diperhitungkan untuk selanjutnya dapat ditentukan apakah “tumpuan ujung” berlaku pada perhitungan pondasi tiang yang bersangkutan.

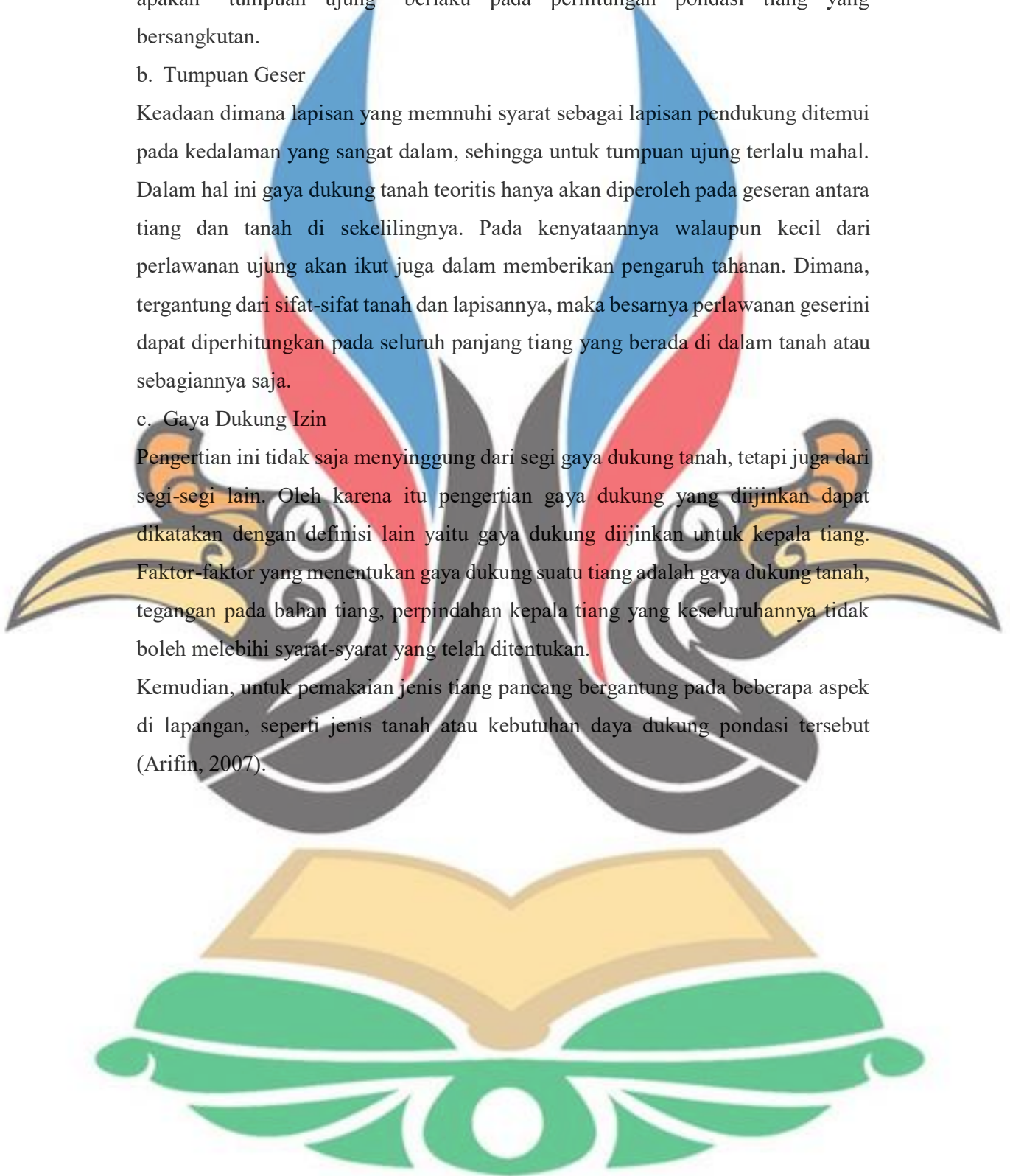
b. Tumpuan Geser

Keadaan dimana lapisan yang memenuhi syarat sebagai lapisan pendukung ditemui pada kedalaman yang sangat dalam, sehingga untuk tumpuan ujung terlalu mahal. Dalam hal ini gaya dukung tanah teoritis hanya akan diperoleh pada geseran antara tiang dan tanah di sekelilingnya. Pada kenyataannya walaupun kecil dari perlawanan ujung akan ikut juga dalam memberikan pengaruh tahanan. Dimana, tergantung dari sifat-sifat tanah dan lapisannya, maka besarnya perlawanan geserini dapat diperhitungkan pada seluruh panjang tiang yang berada di dalam tanah atau sebagiannya saja.

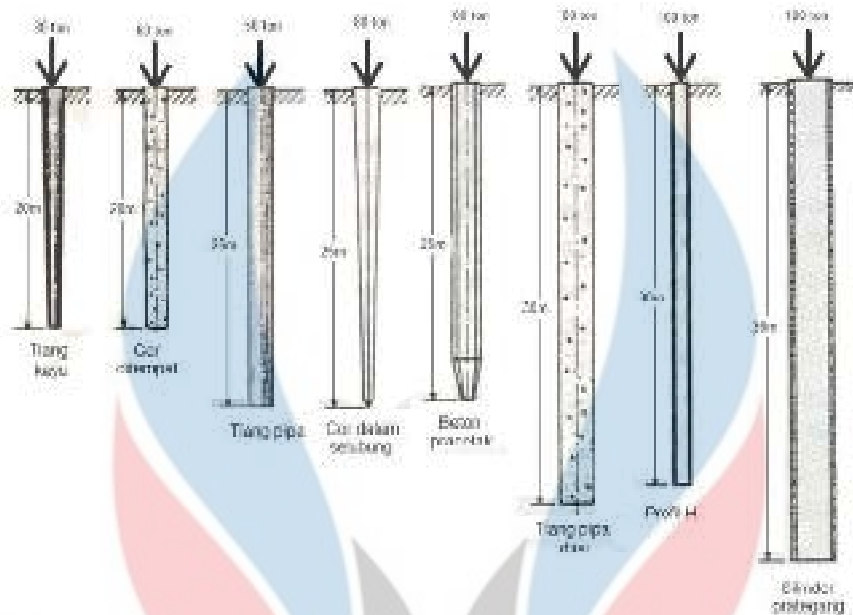
c. Gaya Dukung Izin

Pengertian ini tidak saja menyinggung dari segi gaya dukung tanah, tetapi juga dari segi-segi lain. Oleh karena itu pengertian gaya dukung yang diijinkan dapat dikatakan dengan definisi lain yaitu gaya dukung diijinkan untuk kepala tiang. Faktor-faktor yang menentukan gaya dukung suatu tiang adalah gaya dukung tanah, tegangan pada bahan tiang, perpindahan kepala tiang yang keseluruhannya tidak boleh melebihi syarat-syarat yang telah ditentukan.

Kemudian, untuk pemakaian jenis tiang pancang bergantung pada beberapa aspek di lapangan, seperti jenis tanah atau kebutuhan daya dukung pondasi tersebut (Arifin, 2007).







Gambar 2.3 Jenis Pondasi Tiang

(Sumber: Pranoto, 2017)

### 2.3 Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang

Kapasitas dukung tiang (*pile capacity* atau *pile bearing capacity*) adalah kemampuan atau kapasitas tiang dalam mendukung beban yang bekerja. Melakukan perhitungan kapasitas dukung tiang dapat dilakukan dengan cara pendekatan menggunakan berbagai metode, dilakukan berdasarkan karakteristik kuat geser tanah yang diperoleh dari uji tanah di laboratorium dan uji dilapangan berupa penyelidikan tanah (*Soil Investigation*). Kapasitas dukung pondasi tiang pancang pada tanah tergantung pada kapasitas dukung ujung tiang dan kapasitas geser antara struktur pondasi dengan lapisan tanah. Dimana, kemampuan geser tanah dipengaruhi oleh panjang tiang, sehingga kemampuan geser tanah semakin tinggi dengan bertambahnya kedalaman tiang di dalam tanah (Dhiya'ul Haq, 2018).

#### 2.3.1 Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang dengan Data SPT (*Standard Penetration Test*)

Metode uji penetrasi standar atau *Standard Penetration Test* termasuk cara yang cukup ekonomis untuk memperoleh informasi mengenai kondisi dibawah

permukaan tanah dan diperkirakan 85% dari desain pondasi untuk gedung bertingkat dengan menggunakan metode uji ini. Dimana dalam tahapan perhitungan daya dukung *ultimate* tiang adalah jumlah dari tahanan ujung bawah *ultimate* serta tahanan gesek *ultimate* antara sisi tiang dan tanah disekitarnya menggunakan data SPT dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut.

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (2.1)$$

Keterangan :

$Q_u$  = Kapasitas dukung *ultimate* tiang

$Q_p$  = Kapasitas tahanan ujung tiang

$Q_s$  = Kapasitas tahanan gesek

### 2.3.1.1 Metode Mayerhoff (1956)

Korelasi daya dukung tiang dengan hasil uji data N-SPT yang diusulkan oleh Mayerhoff berdasarkan penyelidikan yang dilakukan pada pondasi tiang pancang yang tertanam pada tanah lempung maupun tipe berpasir halus dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut.

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (2.2)$$

$$Q_u = (C_n \times A_p) + (\sum C_{ii} \times A_s) \quad (2.3)$$

$$Q_{All} = \frac{Q_u}{SF} \quad (2.4)$$

Keterangan :

$Q_u$  = Kapasitas dukung *ultimate* tiang

$Q_p$  = Kapasitas tahanan ujung *ultimate* tiang

$Q_s$  = Kapasitas tahanan gesek

$A_p$  = Luas penampang dasar tiang

$A_s$  = Luas selimut tiang

$C_n$  = Ketentuan nilai koefisien perlawanan ujung tiang (40 N)

$\sum C_{ii}$  = Hambatan geser selimut tiang pada segmen i dimana,  
N/2 (ton/m<sup>2</sup>) untuk tanah lempung atau lanau  
N/5 (ton/m<sup>2</sup>) untuk tanah pasir

SF = Angka keamanan

Mayerhoff memiliki ketentuan untuk nilai koefisien perlawanan ujung tiang  $C_n = 40$  untuk nilai pergerakan gesek tiang  $n = 0.2$  pada tanah lempung berpasir sedangkan untuk nilai  $n = 0.5$  pada tanah kelanauan. Koreksi terhadap muka air tanah dilakukan khusus untuk tanah pasir halus, pasir berlanau dan pasir berlempung yang berada di bawah muka air tanah dan hanya bila nilai  $N > 15$  dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut.

$$N_1 = 15 + \frac{1}{2}(N - 15) \quad (2.5)$$

$$N_1 = 0.6N \quad (2.6)$$

Sedangkan untuk jenis tanah lempung, lanau dan pasir kasar serta tanah yang memiliki nilai  $N \leq 15$  tidak dilakukan perhitungan untuk koreksi. Jadi nilai dari  $N_1$  adalah  $N$ . selanjutnya dilakukan perhitungan untuk pengaruh tekanan vertikal efektif (*overbunden pressure*) pada lapisan tanah dimana harga  $N$  diperoleh. Ketentuan untuk nilai  $N_2$  harus  $\leq 2N_1$ , apabila dari koreksi diperoleh  $N_1 > 2$  maka nilai  $N_2 = 2N_1$  (Hardiyatmo, 2010).

Bila  $P_0 \leq 7.5 \text{ ton/m}^2$ , maka

$$N_1 = \frac{4N_1}{1 + 0.4P_0} \quad (2.7)$$

Bila  $P_0 > 7.5 \text{ ton/m}^2$ , maka

$$N_1 = \frac{4N_1}{3.25 + 0.1P_0} \quad (2.8)$$

Keterangan :

$P_0$  = Tekanan vertikal efektif (*overbunden pressure*)

$N_1$  = Nilai  $N_{SPT}$  rata-rata 8D di atas dasar tiang

$N_2$  = Nilai  $N_{SPT}$  rata-rata 4D di bawah dasar tiang

$\gamma_{sat}$  = Berat volume tanah tak jenuh air

$\gamma_w$  = Berat volume air

$\gamma'$  = Berat volume tanah efektif



### 2.3.1.2 Metode Luciano Decourt (1982)

Analisis perhitungan daya dukung *ultimate* menurut Luciano Decourt (1982) dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut.

$$Q_{ult} = \alpha \left( (N_p \times K) \times A_p \right) + \beta \left( \left( \frac{N_s}{3} + 1 \right) \times A_s \right) \quad (2.9)$$

Keterangan :

- $A_p$  = Luas penampang dasar tiang
- $A_s$  = Luas selimut tiang
- $Q_p$  = Kapasitas tahanan ujung *ultimate* tiang
- $Q_s$  = Kapasitas tahanan gesek
- $\alpha$  = Koefisien dasar tiang
- $\beta$  = Koefisien selimut tiang

Untuk memperoleh daya dukung selimut tiang (*friction pile*) perlu mempertimbangkan rata-rata nilai  $N_{SPT}$  sepanjang tiang yang tertanam. Namun, nilai  $N$  yang diambil untuk memperkirakan besarnya daya dukung ujung tidak boleh dipakai untuk memperkirakan besarnya daya dukung selimut tiang. Sehingga untuk daya dukung ujung tiang (*end bearing capacity*) dan daya dukung selimut tiang (*skin friction bearing*) dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$Q_p = \left[ \alpha \left( N_p \times K \right) A_p \right] \quad (2.10)$$

$$Q_s = \left[ \beta \left( \frac{N_s}{3} + 1 \right) A_s \right] \quad (2.11)$$

$$Q_{All} = \frac{Q_u}{SF} \quad (2.12)$$

Keterangan :

- $A_p$  = Luas penampang dasar tiang
- $A_s$  = Luas selimut tiang
- $Q_p$  = Kapasitas tahanan ujung ultimate tiang
- $Q_s$  = Kapasitas tahanan gesek
- $\alpha$  = Koefisien dasar tiang
- $\beta$  = Koefisien selimut tiang
- $N_p$  = Rata-rata nilai  $N_{SPT}$  pada ujung tiang

$N_s$  = Rata-rata nilai  $N_{SPT}$  sepanjang tiang yang tertanam dengan batas  $3 < N < 50$

$K$  = Koefisien tanah untuk metode Luciano Decourt

Berdasarkan persamaan yang digunakan, koefisien tanah berdasarkan jenis tanah pada lokasi perencanaan untuk metode Luciano Decourt (1982) dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.

**Tabel 2.1** Koefisien Tanah (Metode Luciano Decourt, 1982)

Jenis Tanah	Nilai K (Ton/m <sup>2</sup> )
Lempung	12
Lanau Berlempung	20
Lanau Berpasir	25
Pasir dan Kerikil	40

Untuk perhitungan analisis daya dukung ujung tiang dan daya dukung selimut tiang pada metode Luciano Decourt (1982) digunakan nilai koefisien untuk nilai  $\alpha$  dan nilai  $\beta$  oleh Decourt & Quaresma (1978) dapat dilihat pada **Tabel 2.2** dan **Tabel 2.3** sebagai berikut.

**Tabel 2.2** Koefisien Selimut Tiang  $\alpha$  (Decourt & Quaresma, 1978)

Soil/Pile	Soil/Pile	Soil/Pile	Soil/Pile (Bentonite)	Continuous Hollow Auger	Root Pile	Injected Piles
Clay	1,00	0,85	0,85	0,30	0,85	1,00
Intermediate Soils	1,00	0,60	0,60	0,30	0,60	1,00
Sand	1,00	0,50	0,50	0,30	0,50	1,00

**Tabel 2.3** Koefisien Selimut Tiang  $\beta$  (Decourt & Quaresma, 1978)

Soil/Pile	Soil/Pile	Soil/Pile	Soil/Pile (Bentonite)	Continuous Hollow Auger	Root Pile	Injected Piles
Clay	1,00	0,80	0,90	1,00	1,50	3,00
Intermediate Soils	1,00	0,65	0,75	1,00	1,50	3,00



Soil/Pile	Soil/Pile	Soil/Pile	Soil/Pile (Bentonite)	Continuous Hollow Auger	Root Pile	Injected Piles
Sand	1,00	0,50	0,65	1,00	1,50	3,00

Nilai koefisien untuk daya dukung ujung tiang dan daya dukung selimut tiang berdasarkan jenis pengelompokan tanah pada lokasi proyek pondasi tiang pancang tersebut.

### 2.3.1.3 Metode Reese and O'Neil (1989)

Metode Reese and O'Neil merupakan metode untuk memperoleh kapasitas izin tiang dengan menyarankan pemilihan faktor aman untuk perancangan pondasi tiang. Adapun rumus untuk memperoleh kapasitas dukung pondasi tiang pancang tunggal pada tanah kohesif dengan Metode Reese and O'Neil adalah sebagai berikut.

$$Q_{ult} = Q_p \times Q_s \quad (2.13)$$

$$Q_p = 9C_u \times A_p \quad (2.14)$$

$$Q_s = \alpha \times C_u \times L_i \times P \quad (2.15)$$

Keterangan :

$Q_u$  = Kapasitas dukung *ultimate* tiang

$Q_p$  = Kapasitas tahanan ujung *ultimate* tiang

$Q_s$  = Kapasitas tahanan gesek

$\alpha$  = Koefisien adhesi selimut antara tanah dan tiang

$C_u$  = Kohesi *undrained*

$L_i$  = Panjang lapisan tanah

$P$  = Keliling tiang

Nilai dari faktor adhesi untuk selimut tiang pada tanah lempung menurut Kulhawy dan Mayne (1990) dapat dilihat dalam Tabel 2.4 sebagai berikut.

**Tabel 2.4** Faktor Adhesi untuk Selimut Tiang Pada Tanah Lempung  
(Kulhawy and Mayne, 1990)

Adhesion Factor (Dimensionless)	Undrained Shear Strength, $S_u$ (tsf)	Undrained Shear Strength, $S_u$ (tsf)
0,55	< 0,2	< 21,5
0,49	2,0 - 3,0	21,50 - 32,25
0,42	3,0 - 4,0	32,25 - 43,00
0,38	4,0 - 5,0	43,00 - 53,75
0,35	5,0 - 6,0	53,75 - 64,50
0,33	6,0 - 7,0	64,50 - 75,25
0,32	7,0 - 8,0	75,25 - 86,00
0,31	8,0 - 9,0	86,00 - 96,75
Treat as Rock	> 9	> 96,75

Besarnya beban bekerja atau kapasitas tiang izin ( $Q_u$ ) dengan memperhatikan keamanan terhadap keruntuhan adalah nilai kapasitas ultimit ( $Q_u$ ) dibagi dengan faktor aman (F) sesuai hasil analisis. Beberapa penelitian menyarankan faktor aman yang tidak sama untuk tahanan gesek dinding dan tahanan ujung. Kapasitas izin dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut (Hardiyatmo, 2010).

$$Q_{All} = \frac{Q_u}{2.5} \quad (2.16)$$

Penggunaan faktor aman sebesar 1.5 untuk tahanan gesek dinding ( $Q_s$ ) yang lebih kecil dari faktor aman tahanan ujung tiang yaitu bernilai 3, karena nilai puncak dari tahanan gesek dinding tiang dicapai bila tiang mengalami penurunan 2 sampai 7 mm, sedangkan tahanan ujung ( $Q_p$ ) membutuhkan penurunan yang lebih besar agar tahanan ujungnya bekerja secara penuh. jadi maksud penggunaan faktor faktor aman tersebut adalah untuk meyakinkan tiang terhadap keruntuhan tiang dengan mempertimbangkan penurunan tiang pada beban yang nantinya akan bekerja. Dimana, faktor aman yang tidak sama pada tahanan ujung dan tahanan gesek tiang untuk kapasitas izin dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut (Hardiyatmo, 2010).

$$Q_{All} = \frac{Q_p}{3} + \frac{Q_s}{1.5} \quad (2.17)$$



Keterangan :

$Q_u$  = Kapasitas dukung *ultimate* tiang

$Q_p$  = Kapasitas tahanan ujung *ultimate* tiang

$Q_s$  = Kapasitas tahanan gesek

### 2.3.2 Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang dengan Data Sondir (*Cone Penetration Test*)

*Cone Penetration Test* atau uji sondir merupakan alat pengujian tanah yang paling dikenal serta penggunaannya di Indonesia. Hal ini dikarenakan banyak dijumpai tanah dengan struktur lembek atau biasanya tanah lempung dengan kedalaman yang cukup besar. Sehingga mudah untuk pengujian dengan alat sondir. Teknik pendugaan lokasi atau kedalaman tanah keras dengan menggunakan suatu batang sebagai penekan. Alat sondir berupa suatu tiang berbentuk bulat atau pipa bulat tertutup dengan ujung yang berbentuk kerucut sebagai pengambil sampel tanah. Sehingga dapat diperkirakan serta diketahui sifat-sifat fisik tanah berdasarkan lokasi pengambilan sampel tersebut. Pemeriksaan dengan uji sondir dilakukan untuk mengetahui perlawanan penetrasi konus ( $q_c$ ) dan hambatan lekat tanah ( $f_s$ ) (Arifin, 2007).

#### a. Tahanan Ujung ( $q_c$ )

Tahanan ujung merupakan hasil penekanan ujung konus untuk memperoleh perlawanan tanah yang dipenetrasi. Tahanan ujung diukur sebagai gaya penetrasi persatuan luas penampang ujung konus ( $q_c$ ). besarnya nilai ( $q_c$ ) menunjukkan hasil identifikasi jenis tanah. Pada tanah dengan lapisan pasir, perlawanan ujung yang besar menunjukkan tanah pasir padat. Sedangkan untuk perlawanan ujung kecil menunjukkan pasir halus. Perlawanan ujung yang kecil juga menunjukkan tanah lempung karena kecilnya untuk kuat geser dan pengaruh tekanan air pori pada saat dilakukan penetrasi.

#### b. Hambatan Lekat ( $f_s$ )

Hambatan lekat ( $f_s$ ) diperoleh dari hasil pengukuran perlawanan ujung konus dan selimut secara bersamaan ditekan ke dalam tanah dengan mengurangi hasil pengukuran tahanan ujung konus dimana kedalaman penetrasi tersebut sama. Hambatan lekat ( $f_s$ ) diukur sebagai gaya penetrasi persatuan luas selimut konus.



Dimana hambatan lekat menginterpretasikan sifat-sifat tanah untuk klasifikasi tanah dan memberikan data yang secara langsung dapat digunakan untuk perencanaan pondasi tiang.

c. *Friction Ratio* ( $F_r$ )

*Friction Ratio* adalah perbandingan antara hambatan lekat ( $f_s$ ) dengan tahanan ujung ( $q_c$ ). rasio gesekan dari hasil sondir dapat digunakan untuk membedakan tanah berbutir halus dengan tanah yang berbutir kasar.

$$F_r = \frac{F_s}{Q_c} \quad (2.18)$$

Keterangan :

$F_r$  = Rasio gesekan tiang dengan tanah

$f_s$  = Hambatan lekat

$q_c$  = Tahanan ujung

Dimana, nilai rasio gesekan memiliki ketentuan untuk membedakan klasifikasi tanah adalah sebagai berikut

1. Harga *Friction Ratio* < 1% adalah untuk klasifikasi tanah pasir
2. Harga *Friction Ratio* > 5% adalah untuk klasifikasi tanah lempung
3. Harga *Friction Ratio* > 5% adalah untuk klasifikasi tanah organik

Pada pernyataan Mayerhof (1956) bahwa tahanan ujung tiang mendekati tahanan ujung konus sondir dengan rentang  $2/3q_c$  hingga  $1.5q_c$  (Arifin, 2007). Dengan menggunakan berbagai macam metode, daya dukung tiang pancang tunggal dapat diketahui berdasarkan data hasil pengujian sondir dengan beban izin yang diperhitungkan.

### 2.3.2.1 Metode Mayerhof (1956)

Pada kondisi tanah kohesif, umumnya untuk analisis kapasitas dukung tiang pancang tunggal menggunakan data sondir dihubungkan dengan kohesi tak terdrainasi dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut.

$$Q_{ult} = (q_{cr} \times A_b) + (\sum f_s \times A_s) \quad (2.19)$$

$$Q_{All} = \frac{P_{ult}}{F_s} \quad (2.20)$$

Keterangan :

- $Q_{ult}$  = Kapasitas beban maksimum
- $Q_{allow}$  = Kapasitas beban izin
- $A_s$  = Panjang keliling pondasi tiang
- $A_b$  = Luas dasar penampang pondasi tiang
- $q_{Cr}$  =  $q_c$  rata-rata, sepanjang 4 diameter bagian atas rencana ujung tiang dan 1 diameter dibawah ujung tiang
- $f_s$  =  $q_c / 200 < 1 \text{ kg/cm}^2$  untuk tiang beton  
 $q_c / 200 < 1 \text{ kg/cm}^2$  untuk tiang baja
- FS = Faktor keamanan

### 2.3.2.2 Metode Bagemann (1965)

Pada perencanaan pondasi tiang pancang (*pile*), data tanah sangat diperlukan dalam merencanakan kapasitas dukung dari tiang pancang sebelum pelaksanaan proyek konstruksi dimulai, guna menentukan kapasitas daya dukung ultimit dari tiang pancang tunggal menggunakan data sondir pada kondisi tanah lempung Metode Bagemann mengusulkan perhitungan kapasitas dukung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Arifin, 2007).

$$Q_{All} = \frac{q_c}{3} + \frac{JHP \times Q}{5} \quad (2.21)$$

$$q_c = \frac{1}{2} + (q_{cu} + q_{cb}) \quad (2.22)$$

Keterangan :

- $Q_{allow}$  = Kapasitas dukung izin
- $q_{cu}$  =  $q_c$  rata-rata sepanjang 8 diameter bagian atas ujung tiang
- $q_{cb}$  =  $q_c$  rata-rata sepanjang 3.5 diameter bagian bawah ujung tiang
- A = Luas dasar penampang pondasi tiang
- JHP = Jumlah hambatan pelekat
- Q = Panjang keliling pondasi tiang

### 2.3.2.3 Metode Trofimankove (1974)

Metode Trovimankove memiliki metode untuk memperhitungkan perkiraan kapasitas dukung pondasi tiang pancang tunggal berdasarkan data sondir yang dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut (Arifin, 2007).

$$Q_{All} = \frac{K_b \times q_c \times A + \left( \left( \frac{JHP}{D} \right) Q \right)}{F_s} \quad (2.23)$$

Keterangan :

- $Q_{allow}$  = Kapasitas beban izin
- $K_b$  = Resistensi faktor tahanan ujung tiang (0,75)
- $q_{cb}$  = Tahanan ujung tiang
- $A$  = Luas dasar penampang pondasi tiang
- $JHP$  = Jumlah hambatan pelekat
- $Q$  = Panjang keliling pondasi tiang
- $D$  = Koefisien penampang pondasi tiang (1.5 – 3)
- $FS$  = Faktor keamanan

### 2.3.3 Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang dengan Data Uji Laboratorium

#### 2.3.3.1 Metode Mayerhoff (1956)

Kapasitas dukung ultimit tiang tunggal dapat dihitung dengan menggunakan kolerasi data hasil uji laboratorium. Dari data hasil uji laboratorium dapat dihitung nilai kapasitas tahanan ujung tiang dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Hardiyatmo, 2010).

$$Q_b = A_b \times f_b \quad (2.24)$$

$$f_b = (C_b \times N_c) + P_b \quad (2.25)$$

Keterangan :

- $Q_b$  = Tahanan ujung bawah ultimit.
- $A_b$  = Luas penampang dasar tiang.
- $f_b$  = Tahanan ujung satuan tiang.



- $C_b$  = Kohesi tak ter drainase pada ujung tiang, sesuai kedalaman tinjauan.  
 $N_c$  = Faktor kapasitas dukung, dimana  $N_c = 9$  (Skempton, 1959)  
 $P_b$  = Tekanan *overbunden*

### 3.3.3.2 Metode $\alpha$

Menentukan tahanan gesek tiang yang dipancang di dalam tanah lempung, digunakan faktor adhesi ( $\alpha$ ) yang dikumpulkan McClelland (1974) pada **Gambar 2.4**. Maka dengan menggunakan metode  $\alpha$  nilai tahanan gesek tiang dengan korelasi data laboratorium adalah sebagai berikut. (Yusti, 2014).

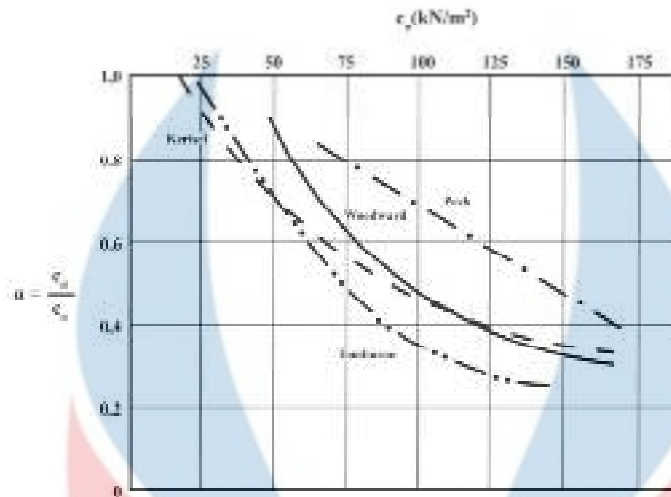
$$Q_s = A_s \times f_s \quad (2.26)$$

$$f_s = C_d = \alpha \times C_u \quad (2.27)$$

Keterangan :

- $Q_s$  = Tahanan gesek ultimit  
 $A_s$  = Luas selimut tiang  
 $f_s$  = Tahanan gesek per satuan luas  
 $C_d$  = Adhesi antara tiang dan tanah di sekitarnya  
 $\alpha$  = Faktor adhesi diambil dari grafik pada (Gambar 2.4)  
 $C_u$  = Kohesi tak terdrainase rata-rata di sepanjang tiang

Berikut adalah grafik untuk faktor adhesi oleh McClelland (1974) berdasarkan nilai kohesi tak terdrainase berdasarkan penggunaan metode kapasitas dukung, pada **Gambar 2.4** sebagai berikut.



Gambar 2.4 Faktor Adhesi ( $\alpha$ ) McClelland (1974)  
(Sumber: Yusti, 2014)

### 2.3.4 Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang dengan Data PDA (*Pile Driving Analyzer*)

*Pile Driving Analyzer* adalah suatu sistem pengujian dengan menggunakan data digital komputer yang diperoleh dari *strain transducer* dan *accelometer* untuk memperoleh kurva gaya dan kecepatan ketika tiang dipukul menggunakan *hammer* dengan berat tertentu. Hasil dari pengujian PDA terdiri dari kapasitas tiang, penurunan, energi palu. Pada umumnya pengujian dengan metode PDA dilaksanakan setelah tiang mempunyai kekuatan yang cukup untuk menahan tumbukan palu. Metode lain yang dapat digunakan untuk menahan tumbukan adalah dengan merendahkan tinggi jatuh *hammer* dan menggunakan *hammer* yang lebih berat (Geotesting, 2019).

#### 2.3.4.1 Metode Sanders (1851)

Menurut (Hardiyatmo, 2010) rumus dinamis didasarkan juga pada hubungan persamaan berikut.

$$Energi_{Masuk} = Energi_{digunakan} + Energi_{hilang} \quad (2.28)$$

Dimana, energi yang digunakan sama dengan tahanan tiang waktu pemancangan (*driving resistance*) dikalikan dengan perpindahan tiang. Jika energi yang masuk (*energy input*) telah diketahui, dapat dilakukan estimasi untuk besarnya energi yang hilang berdasarkan pada pengalaman pelaksanaan. Dengan mengamati gerakan tiang waktu dipancang dapat ditentukan tahanan tiang waktu pemancangan. Energi yang dihasilkan oleh pemukul ditransformasikan sebagai gaya ( $Q_u$ ) yang menghasilkan penetrasi tiang sebesar ( $s$ ) dan energi yang hilang sewaktu pemancangan ( $\Delta E$ ).

$$E = (Q_u \times S) + \Delta E \quad (2.29)$$

$$W_r \times h = (Q_u \times S) + (Q_u \times C) \quad (2.30)$$

$$W_r \times h = Q_u (S + C) \quad (2.31)$$

Maka dari persamaan diatas, diperoleh energi untuk penetrasi yang ditransformasikan dari pemukul sebagai

$$Q_u = \frac{W_r \times h}{S + C} \quad (2.32)$$

Keterangan :

- E = Modulus elastis bahan tiang pancang ( $FL^{-2}$ )
- $Q_u$  = Kapasitas tiang *ultimate*
- S = Penetrasi tiap pukulan (L)
- $W_r$  = Berat ram, pemukul aksi dobel termasuk *casing* (F)
- C = Konstanta empiris energi hilang  
C umumnya diambil 0,1" atau 0,25 cm untuk pemukul mesin tenaga uap  
C umumnya diambil 1" atau 2,5 cm untuk pemukul yang dijatuhkan
- h = Tinggi jatuh pemukul (L)

#### 2.3.4.2 Metode Engineering News Record oleh (Bowles, 1988)

Rumus ENR didasarkan pada penggunaan satu faktor kehilangan energi saja dan dengan mengambil faktor  $E_h = 1$ , sebagai berikut :

Pemukul Jatuh (*Drop Hammer*)

$$Q_u = \frac{W_r \times S}{S + 2.5} \quad (2.33)$$



Pemukul Tenaga Uap (*Steam Hammer*)

$$Q_u = \frac{W_r \times h}{S + 0.25} \quad (2.34)$$

Dengan kapasitas izin tiang dengan faktor aman untuk rumus ENR adalah

$$Q_{All} = \frac{Q_u}{F_s} \quad (2.35)$$

Keterangan :

- E = Modulus elastis bahan tiang pancang ( $FL^{-2}$ )
- $Q_u$  = Kapasitas tiang *ultimate*
- S = Penetrasi tiap pukulan (L)
- $W_r$  = Berat ram, pemukul aksi dobel termasuk *casing* (F)

Dari persamaan diatas untuk kapasitas tiang *ultimate* satuan panjang untuk nilai (h) dan (s) yang digunakan adalah centimeter dan satuan berat untuk  $W_r$  dalam kilogram serta faktor aman  $F = 6$ . Pada tahun-tahun terakhir, untuk rumus ENR dimodifikasi menjadi (Bowles, 1988).

$$Q_u = \frac{E_h \times W_r \times h \left( W_r + \left( n^2 \times W_p \right) \right)}{(S + 0.25) \times (W_r + W_p)} \quad (2.36)$$

Keterangan :

- $Q_u$  = Kapasitas tiang *ultimate*
- S = Penetrasi tiap pukulan (L)
- h = Tinggi jatuh pemukul (L)
- $W_r$  = Berat ram, pemukul aksi dobel termasuk *casing* (F)
- $W_p$  = Berat tiang termasuk berat penutup tiang, *driving shoe* dan blok penutup (*cap block*) juga termasuk anvil untuk pemukul uap aksi dobel (F)
- $e_h$  = Efisiensi pemukul (*hammer efficiency*)
- n = Koefisien restitusi

**Tabel 2.5** Nilai Efisiensi  $e_h$  (Bowles, 1977)

Tipe	Efisiensi
Pemukul Jatuh (Drop Hammer)	0,75 - 1
Pemukul Aksi Tunggal (Single Acting Hammer)	0,75 - 0,85
Pemukul Aksi Dobel (Double Acting Hammer)	0,85
Pemukul Diesel (Diesel Hammer)	0,85 - 1

**Tabel 2.6** Koefisien Restitusi  $n$  (Bowles, 1977)

Material	$n$
<i>Broomed Wood</i>	0
Tiang Kayu (Ujung Tanpa Rusak)	0,25
Bantalan Kayu Padat Pada Tiang Baja	0,32
Bantalan Kayu Padat di Atas Tiang Baja	0,40
Landasan Baja Pada Baja (Steel on steel anvil), Pada Tiang Baja atau Beton	0,50
Pemukul Besi Cor Pada Tiang Beton Tanpa Penutup ( <i>cap</i> )	0,40

### 2.3.4.3 Metode Janbu (1953)

Pada penggunaan Metode Janbu, nilai efisiensi pemukul ( $e_h$ ) bergantung pada kondisi pemukul dan blok penutup (*Capblock*) dan kondisi tanah (khususnya untuk pemukul tenaga uap). Rumus yang digunakan Metode Janbu adalah sebagai berikut.

$$Q_u = \frac{e_h \times W_r \times h}{K_u \times S} \quad (2.37)$$

Dengan persamaan,

$$K_u = C_d \left[ 1 + \left( 1 + \frac{\lambda}{C_d} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.38)$$

$$C_d = 0.75 + 0.15 \left( \frac{W_p}{W_r} \right) \quad (2.39)$$

$$\lambda = \frac{e_h \times E_h \times L}{A \times E \times S^2} \quad (2.40)$$

Keterangan :

- $Q_u$  = Kapasitas tiang *ultimate*
- $S$  = Penetrasi tiap pukulan (L)
- $h$  = Tinggi jatuh pemukul (L)
- $W_r$  = Berat ram, pemukul aksi dobel termasuk *casing* (F)
- $W_p$  = Berat tiang termasuk berat penutup tiang, *driving shoe* dan blok penutup (*cap block*) juga termasuk anvil untuk pemukul uap aksi dobel (F)
- $e_h$  = Efisiensi pemukul (*hammer efficiency*)
- $A$  = Luas tampang melintang tiang (L<sup>2</sup>)
- $K_u$  = Kompresi elastis tiang
- $C_d$  = Adhesi antara dinding tiang dan tanah di sekitarnya (kN/m<sup>2</sup>)

Berdasarkan **Persamaan 2.40** dalam mencari nilai koefisien efisiensi pemukul dapat dilihat berdasarkan **Tabel 2.5**.

## 2.4 Software PLAXIS 2D

PLAXIS merupakan program bantu dalam ilmu geoteknik yang secara khusus menganalisis deformasi dan stabilitas untuk berbagai aplikasi permasalahan serta penanganan geoteknik dalam konstruksi. Seperti analisis untuk daya dukung tanah, program ini menerapkan model antarmuka grafis yang mudah digunakan sehingga pengguna dapat dengan mudah membuat model geometri dan jaring elemen berdasarkan penampang melintang dari kondisi yang ingin di analisis. Pada pengoperasiannya program ini terdiri atas 4 bagian program yaitu masukan (*input*), perhitungan (*calculate*), keluaran (*output*), dan grafik maupun kurva (*curve*).

Melakukan pengaplikasian kondisi di lapangan yang disimulasikan ke dalam program PLAXIS bertujuan untuk mengimplementasikan tahapan pelaksanaan di lapangan ke dalam tahapan pengoperasian melalui program, dengan harapan pelaksanaan di lapangan dapat di komparasi sedekat mungkin pada program. Sehingga keluaran yang dihasilkan program dapat dijadikan asumsi untuk cerminan dari kondisi yang ada di lapangan kedepannya terhadap struktur bawah konstruksi.

Permodelan elemen hingga (*finite element*) dengan menggunakan *software* PLAXIS untuk melakukan perhitungan deformasi selama konstruksi pada pondasi



tiang pancang tunggal. Adapun langkah-langkah permodelan untuk analisis menggunakan *software* PLAXIS adalah sebagai berikut .

1. Buka PLAXIS *Input*, kemudian memberi label pada judul proyek dan memilih model sesuai proyek yang akan di simulasikan.
2. *Input* serta mendeskripsikan satuan dan dimensi dari *geometry project* yang akan dimodelkan. Setelah permodelan selesai dibuat sesuai dengan gambar rencana dari kondisi asli di lapangan, selanjutnya aktifkan *Geometry Line*.
3. Kemudian hubungan antara struktur dengan tanah diberikan ilustrasi. Setelah itu memasukkan material dari parameter tanah dan parameter struktur geoteknik dari tiap lapisan.
4. Selanjutnya melakukan *meshing* untuk membagi material tanah ke dalam beberapa elemen diskrit yang berhingga.
5. Kemudian menampilkan kondisi awal untuk memberikan gambaran muka air tanah pada permodelan geometri. Hitung tegangan awal yang terjadi untuk mengetahui tegangan efektif.
6. Tahapan kalkulasi, dilakukan untuk menghitung deformasi dan angka aman dengan simulasi ke dalam beberapa fase (*Phase*).
7. Setelah seluruh fase telah dibuat, maka titik nodal yang akan ditinjau selanjutnya ditentukan.
8. Setelah menentukan nodal, lakukan *run* agar jendela *output* yang menghasilkan nilai deformasi dan tegangan-tegangan yang terjadi dapat diperoleh.

Pada penggunaan program PLAXIS V 8.6 perlu diperhatikan untuk beban-beban yang di masukan serta bagian-bagian lapisan tanah yang dimodelkan pada *material set*. Setelah hasil *calculation* dari program telah diperoleh, maka hasil perhitungan kapasitas dukung tiang pancang dengan metode elemen hingga dapat di rekapitulasi dan kemudian dapat dianalisis daya dukung *ultimate* tiang pancang tersebut. Berikut adalah persamaan untuk perhitungan daya dukung pondasi tiang pancang berdasarkan hasil *output* dari program PLAXIS (PLAXIS Model Version 8).

$$Q_u = \sum M_{sf} \times P_{All} \quad (2.41)$$

Keterangan :

$\sum M_{sf}$  = Faktor keamanan *output* program PLAXIS.

$P_{All}$  = Beban izin yang bekerja.

## 2.5 Klasifikasi Teknis Tanah

Agar bangunan dapat berdiri dengan stabil dan tidak timbul penurunan yang terlalu besar, maka pondasi bangunan harus mencapai lapisan tanah yang cukup padat. Dimana, untuk mengetahui letak atau kedalaman lapisan tanah padat dan kapasitas daya dukung tanah (*Bearing Capacity*) yang diizinkan perlu dilakukan penyelidikan mekanika tanah yang mencakup penyelidikan dilapangan dan penelitian di laboratorium (Dhiya'ul Haq, 2018).

### 2.5.1 Klasifikasi dan Identifikasi Tanah

Dalam perancangan pondasi, klasifikasi tanah berguna sebagai petunjuk awal dalam memprediksi perilaku tanah. Dalam klasifikasinya, secara garis besar tanah dibagi menjadi 2 kelompok yaitu tanah berbutir kasar dan berbutir halus yang didasarkan material yang lolos saringan No.200 diameter 0.075 milimeter. Dalam penamaan menurut jenisnya, huruf pertama merupakan singkatan dari penamaan jenis tanah tersebut.

- G = Kerikil (*Gravel*)
- S = Pasir (*Sand*)
- M = Lanau (*Silt or MO*)
- C = Lempung (*Clay*)
- O = Organik (*Organic*)
- Pt = Gambut (*Peat*)

Sedangkan, untuk huruf kedua dari klasifikasi dinyatakan dalam istilah-istilah

- W = Gradasi Baik (*Well Graded*)
- P = Gradasi Buruk (*Poor Graded*)
- L = Plastisitas Rendah (*Low Plasticity*)
- H = Plastisitas Tinggi (*High Plasticity*)



## 2.5.2 Sifat-Sifat Teknis Tanah

### a. Tanah Granuler

Tanah-tanah granuler seperti pasir, kerikil, batuan dan campurannya memiliki sifat teknis yang sangat baik. Sifat-sifat tanah tersebut adalah sebagai berikut (Das, 1995) :

1. Merupakan material yang baik untuk mendukung bangunan dan badan jalan, karena mempunyai kapasitas dukung yang tinggi.
2. Penurunan kecil, dengan ketentuan tanah relatif padat serta memiliki permeabilitas yang besar.
3. Merupakan material yang baik untuk tanah urug karena menghasilkan tekanan lateral yang kecil.
4. Mempunyai tahanan kuat geser yang tinggi.

### b. Tanah Kohesif

Tanah kohesif seperti lempung, lempung berlanau, maupun lempung berpasir yang sebagian besar butiran tanahnya terdiri dari butiran halus. Kuat geser tanah ini biasanya ditentukan dari kohesinya. Berikut adalah sifat-sifat dari tanah kohesif :

1. Kuat geser rendah dan menurun jika kadar air bertambah.
2. Merupakan material kedap air, bila basah bersifat plastis serta mudah mampat.
3. Material akan menyusut apabila kering dan mengembang apabila basah.
4. Material yang buruk untuk tanah urug dan berubah volumenya dengan bertambahnya waktu akibat adanya beban yang konstan.

### c. Tanah Lanau

Tanah lanau memiliki sifat-sifat fisik tanah sebagai berikut :

1. Kuat geser rendah.
2. Kapilaritas material tinggi dan permeabilitas rendah.
3. Kerapatan relatif rendah serta sulit dipadatkan

### d. Tanah Organik

Sifat-sifat dari tanah organik anantara lain mempunyai karakteristik yang kurang menguntungkan diantaranya (Das, 1995) :

1. Kuat geser rendah dan mudah mampat.
2. Material bersifat asam.