

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Definisi serta Hubungan Antara Susunan Tanah

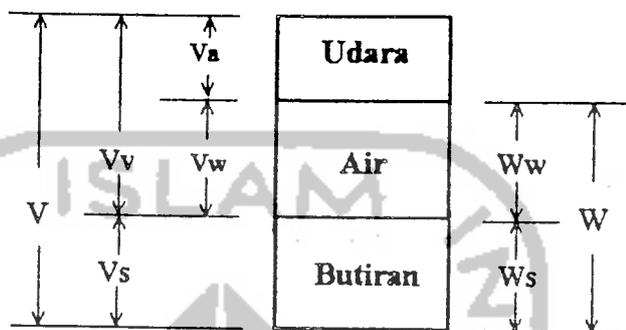
Definisi serta istilah-istilah yang dipakai untuk menyatakan berat isi, banyaknya pori, serta jumlah air dan udara dalam tanah seperti tabel 3.1.

Tabel 3.1 Definisi dan istilah-istilah dalam tanah (Wesley L. D., 1977)

Sifat	Simbol	Definisi
Berat isi tanah	γ	Perbandingan antara berat tanah seluruhnya dengan isi tanah seluruhnya
Berat isi butir	γ_s	Perbandingan antara berat butir dengan isi butir
Berat isi air	γ_w	Perbandingan antara berat air dengan isi air
Berat isi kering	γ_d	Perbandingan antara berat butir dengan isi tanah seluruhnya
Kadar air	w	Perbandingan antara berat air dengan berat butir tanah
Angka pori	e	Perbandingan antara isi pori dengan isi butir tanah
Porositas	n	Perbandingan antara isi pori dengan isi tanah seluruhnya
Berat jenis	G	Perbandingan antara berat isi butir tanah dengan berat isi air
Derajat kejenuhan	S_r	Perbandingan antara isi air pori dengan isi pori

Untuk mendapatkan hubungan antara berat isi, kadar air, angka pori dan sebagainya, kita dapat meninjau sejumlah tanah yang mengandung satuan isi

butirnya. Tanah tersebut terdiri dari tiga bagian yaitu butiran, sejumlah air, dan sejumlah udara, seperti terlihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram susunan tanah (Daruslan, 1994)

Notasi :

V = volume total,

V_v = volume pori,

V_a = volume udara,

V_w = volume air,

V_s = volume butiran,

W = berat total,

W_w = berat air,

W_s = berat butiran.

Dengan memakai definisi-definisi pada tabel 3.1, maka hubungan antara berat serta isi dari ketiga susunan tanah dapat dihitung dengan memakai persamaan-persamaan sebagai berikut :

$$1) \text{ Kadar air } (w) = (W_w / W_s) \cdot 100\%$$

$$w = (e S_r \gamma_w) / (G \gamma_w) = (e S_r) / (G) \quad (3.1)$$

$$2) \text{ Berat isi } (\gamma) = W / V$$

$$\gamma = (\gamma_w (G + e S_r)) / (1 + e)$$

$$= (\gamma_w (G + w G)) / (1 + e)$$

$$= (\gamma_w G (1 + w)) / (1 + e) \quad (3.2)$$

3) Angka pori (e) = V_v / V_s

$$e = ((\gamma_w G (1 + w)) / \gamma) - 1 \quad (3.3)$$

4) Berat isi kering (γ_d) = W_s / V

$$\gamma_d = \gamma / (1 + w) \quad (3.4)$$

5) Porositas (n) = V_v / V

$$n = e / (1 + e) \quad (3.5)$$

6) Berat isi butir (γ_s) = W_s / V_s (3.6)

7) Derajat kejenuhan (S_r) = V_w / V_v (3.7)

3.2 Konsolidasi

Proses konsolidasi dapat dipercepat dengan menggunakan drainasi vertikal yang berupa tiang-tiang kolom pasir yang dibungkus dengan geotekstil yang dimasukkan ke dalam tanah lempung. Dengan drainasi vertikal konsolidasi akan terjadi dalam 3 dimensi, yaitu ke arah vertikal, arah horisontal/radial serta gabungan arah vertikal dan arah horisontal (Daruslan, 1994).

Pada pondasi ini konsolidasi juga sangat dipengaruhi oleh harga dari masing-masing permeabilitas dan koefisien konsolidasi. Dalam menentukan parameter tersebut dicari hubungan antara penurunan dan waktu konsolidasi. Ada 2 cara yang dapat dipakai yaitu :

a. Dari grafik $S - \log t$ (cara Cassagrande)

b. Dari grafik $S - \sqrt{t}$ (cara Taylor)

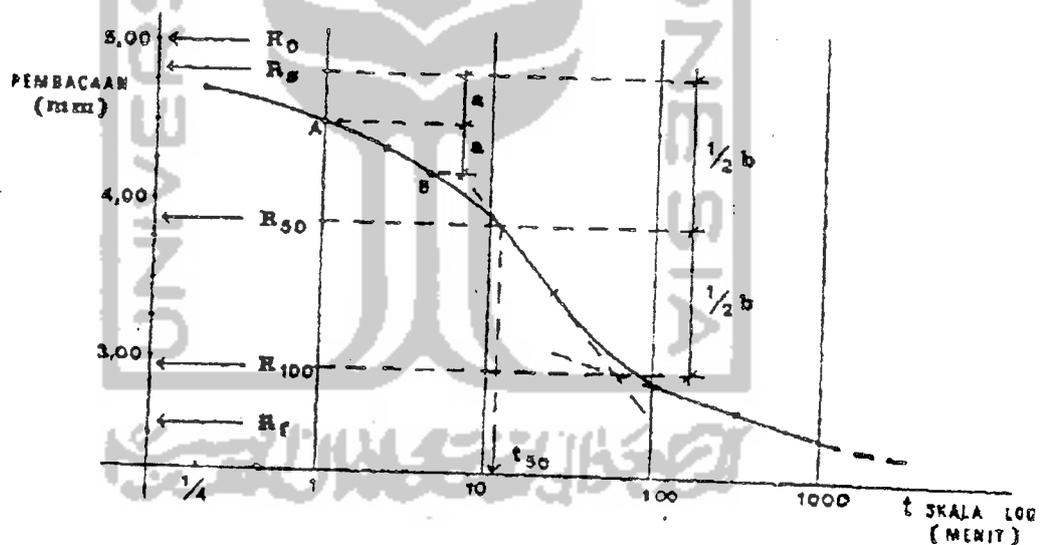
a. Cara Cassagrande (grafik S - log t)

Mula-mula dipelajari adalah hubungan antara derajat konsolidasi dan faktor waktunya ($U - \log T_v$) yang ditabelkan sebagai berikut.

Tabel 3.2 Hubungan antara U_v dan T

U_v	0	0,1	0,115	0,20	0,357	0,50	0,90	0,93	1,0
T	0	0,008	0,01	0,031	0,10	0,196	0,848	1,0	~

Hubungan antara pengamatan dan penurunan (pembacaan arloji ukur) dalam t skala log, dapat dilihat pada grafik 3.1



Grafik 3.1 Hubungan S - log t (Daruslan, 1994)

Sebagian besar grafik teoritis dan hasil pembacaan laboratorium adalah sama, dengan perbedaan :

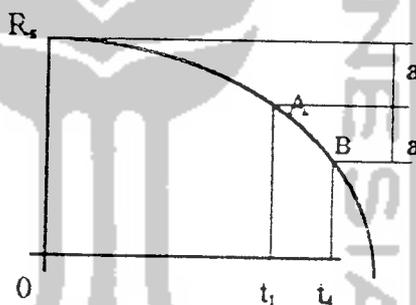
1. Bagian awal saat beban diletakkan terjadi penurunan mendadak karena masih terdapat udara dalam pori, yaitu bagian dari R_0 sampai R_s maka teoritis dianggap R_s sebagai keadaan awal ($U = 0\%$)

2. Dari R_s sampai $\pm R_{60}$ berupa parabola dan dari R_{60} ke $\pm R_{80}$ garis lurus, dianggap bagian garis yang tepat seperti garis teoritis.
3. Bagian akhir teoritis asimtotis ternyata miring berarti masih ada penurunan, disebut konsolidasi sekunder.

Cara mencari R_s ; R_{100} dan R_{50} dari grafik 3.1 adalah :

1. Mencari R_s ($U = 0\%$)

Digunakan sifat dari parabola, yaitu untuk sembarang jarak horisontal dari 0 ke t_1 dan dari t_1 ke t_4 (kelipatan - 4) akan mempunyai jarak vertikal yang sama.



Grafik 3.2 Cara mencari R_s (Daruslan, 1994)

Maka cara menentukan R_s dari grafik 3.2 :

- a. Ambil $t_1 = 1$ menit (titik A) dan $t_2 = 4$ menit (titik B)
 - b. Ukur jarak vertikal antara A dan B ($= a$)
 - c. Ukur a di atas A maka diperoleh R_s
2. Mencari R_{100} ($U = 100\%$)
- Cari perpotongan kedua bagian lurus dari grafik bagian akhir. Titik perpotongan adalah R_{100} .

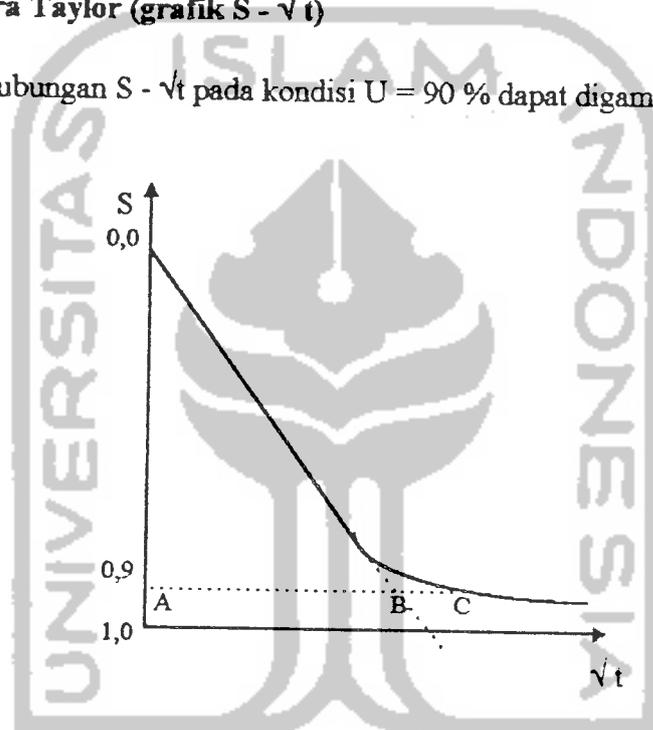
3. Mencari R_{50} ($U = 50 \%$)

Bagi dua sama besar jarak vertikal R_s ke R_{100} .

4. Perpotongan R_{50} dengan grafik mempunyai absis t_{50} . (t_{50} = waktu, dalam menit untuk mencapai konsolidasi 50 % dari benda uji)

b. Cara Taylor (grafik $S - \sqrt{t}$)

Hubungan $S - \sqrt{t}$ pada kondisi $U = 90 \%$ dapat digambarkan dalam grafik 3.3.

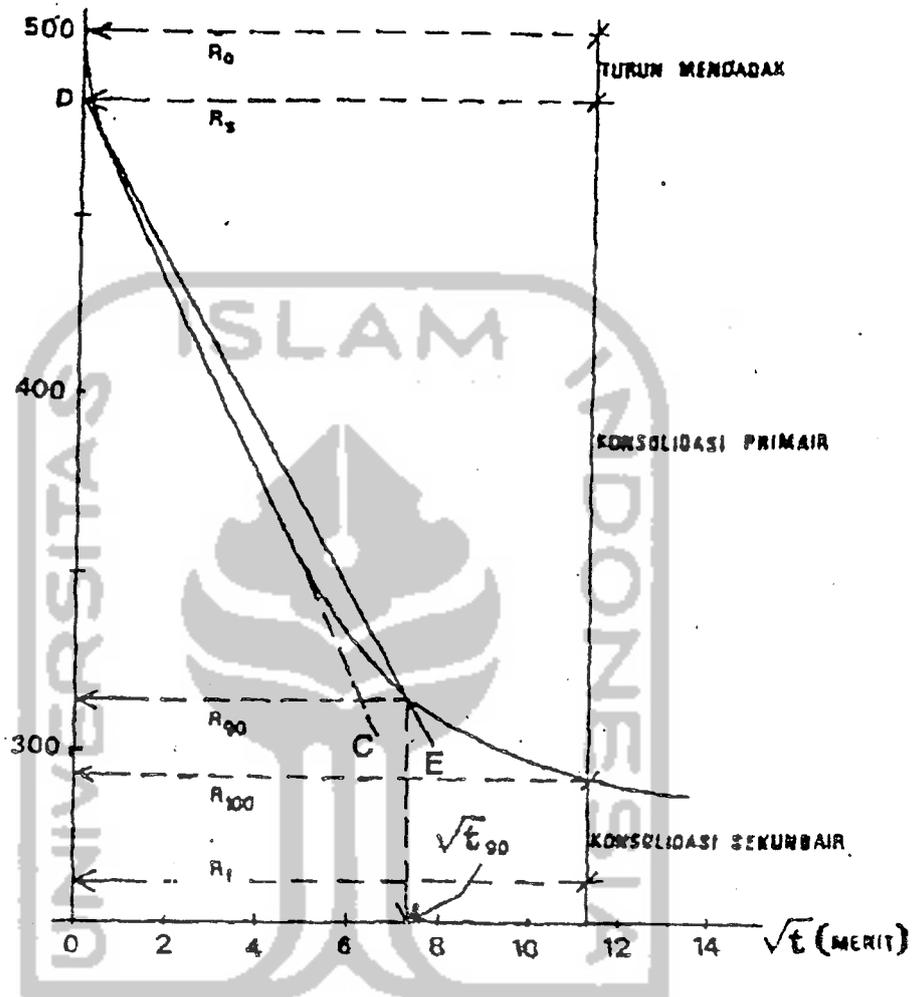


Grafik 3.3 Hubungan $S - \sqrt{t}$ (Darusan, 1994)

Pada grafik 3.3 dari $U = 0 \%$ sampai sekitar $U = 60 \%$ berupa garis lurus dan selanjutnya garis lengkung. Jika ditarik garis $U = 90 \%$ dan dipotongkan dengan perpanjangan bagian lurus (= B) dan dengan kurva $S - \sqrt{t}$ (= C) ternyata $AC = 1,15 \cdot AB$.

Cara mencari t_{90} dengan menggunakan grafik 3.4 berikut.

1. Gambarkan hasil pembacaan arloji ukur hubungan penurunan (S) dan akar waktu (\sqrt{t}) sebagai absis.



Grafik 3.4 Hubungan $S - \sqrt{t}$ (Daruslan, 1994)

Bagian awal lengkung pendek (turun mendadak) kemudian lurus dan bagian akhir lengkung lagi.

2. Cari D ($= R_s$) perpanjangan bagian lurus ke atas.
3. Tarik DE yang lebih landai 1,15 kali dari garis DC.
4. Perpotongan DE dengan grafik $S - \sqrt{t}$ adalah :
 - ordinatnya = R_{90}
 - absisnya = \sqrt{t}_{90}

Perhitungan koefisien konsolidasi bagi suatu tanah ternyata nilainya tidak konstan terhadap beban yang bekerja. Dalam hal ini angka pori juga sangat berpengaruh terhadap koefisien perubahan volume dan koefisien permeabilitasnya.

Besarnya harga koefisien tersebut dihitung dengan rumus :

$$mv = \frac{e_0 - e_1}{\sigma_p \cdot (1 + e_0)} \quad (3.8)$$

$$C_v = \frac{k}{mv \cdot \gamma_w} \quad (3.9)$$

Notasi :

mv = koefisien perubahan volume (m^2/kN)

e_0 = *void ratio* yang berhubungan dengan *effective overburden* (p_0)

e_1 = *void ratio* yang berhubungan dengan penambahan tekanan

σ_p = tegangan efektif akibat pembebanan (kN/m^2)

C_v = koefisien konsolidasi (m^2/dt)

k = koefisien permeabilitas (m/dt)

γ_w = berat unit air (kN/m^3)

3.2.1 Konsolidasi Arah Vertikal

Konsolidasi dianggap tidak ada drainasi arah horisontal. Derajat konsolidasi arah vertikal yang tercapai dalam waktu t dapat dihitung dengan persamaan :

$$U_v = f_1(T_v) \quad (3.10)$$

dimana :

$$T_v = \frac{C_v}{H^2} t \quad (3.11)$$

Notasi :

U_v = derajat konsolidasi arah vertikal

t = waktu konsolidasi (hari)

T_v = faktor waktu konsolidasi arah vertikal (tak berdimensi)

C_v = koefisien konsolidasi arah vertikal (m^2 /hari)

H = panjang lintasan drainasi vertikal (m)

$U_v = f_1(T_v)$ dapat berupa rumus pendekatan,

untuk $U_v < 0,6$, maka $T_v = (\pi/4) U_v^2$

untuk $U_v > 0,6$, maka $T_v = -0,933 \log(1-U_v) - 0,085$

3.2.2 Konsolidasi Arah Horisontal

Keadaan dengan anggapan hanya terjadi konsolidasi dan penurunan tanah akibat air mengalir ke arah drainasi vertikal. Hubungan antara derajat konsolidasi arah horisontal/radial dan waktu t , dinyatakan dalam faktor waktu (T_r) adalah :

$$U_r = f_2(T_r) \quad (3.12)$$

dimana :

$$T_r = \frac{C_h}{(2R)^2} t \quad (3.13)$$

Notasi :

U_r = derajat konsolidasi arah horisontal/radial

t = waktu konsolidasi (hari)

C_h = koefisien konsolidasi arah horisontal (m^2 / hari)

R = panjang jari-jari pengaruh (m)

$R = 0,564 a$, untuk susunan bujur sangkar

$R = 0,525 a$, untuk susunan segi tiga dengan,

a = jarak antara masing-masing drainasi kolom pasir vertikal (m)

T_r = faktor waktu konsolidasi arah horisontal (tak berdimensi)

U_r = $f_2(T_r)$ dapat berupa rumus pendekatan,

$$U_r = 1 - e^{-8 T_r / y} \quad (3.14)$$

dengan harga y :

$$y = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \quad (3.15)$$

$$T_r = - (y / 8) \ln (1 - U_r) \quad (3.16)$$

$n = R / r$, perbandingan jari-jari pengaruh dan jari-jari drainasi vertikal.

Tabel 3.3 Harga T_r untuk beberapa nilai U_r dan n (Daruslan, 1994)

U_r	$n = 5$	$n = 10$	$n = 20$	$n = 100$
0,1	0,012	0,021	0,030	0,051
0,2	0,026	0,041	0,063	0,107
0,3	0,042	0,070	0,101	0,172
0,4	0,060	0,101	0,144	0,246
0,5	0,081	0,137	0,195	0,334
0,6	0,107	0,180	0,258	0,441
0,7	0,137	0,231	0,330	0,564
0,8	0,187	0,317	0,453	0,715
0,9	0,276	0,455	0,649	1,110
1,0	~	~	~	~

3.2.3 Konsolidasi Gabungan Arah Vertikal dan Arah Horisontal

Apabila tanah mengalami konsolidasi vertikal dan horisontal/radial, masing-masing mencapai derajat konsolidasi arah vertikal dan derajat konsolidasi arah horisontal, sehingga derajat konsolidasi gabungan yang akan dicapai :

$$(1 - U) = (1 - U_v) \cdot (1 - U_r) \quad (3.17)$$

Notasi :

U = derajat konsolidasi gabungan

U_v = derajat konsolidasi arah vertikal

U_r = derajat konsolidasi arah horisontal/radial

3.2.4 Permeabilitas (*Permeability*)

Permeabilitas adalah sifat bahwa zat cair dapat mengalir lewat bahan berpori (Daruslan, 1994). Derajat permeabilitas suatu tanah ditentukan oleh beberapa faktor diantaranya ukuran pori, jenis tanah, kepadatan tanah. Permeabilitas dapat terjadi dalam satu lapisan tanah atau beberapa lapisan tanah, baik arah sejajar maupun arah vertikal.

Dalam penelitian ini tanah lempung, geotekstil dan pasir dianggap sebagai suatu ketebalan yang terdiri dari beberapa lapisan dan mempunyai harga permeabilitas (k) yang berbeda, dimana arah aliran air pori tagak lurus bidang. Perhitungan permeabilitas ekuivalen arah tegak lurus bidang berlapis adalah :

a. permeabilitas ekuivalen arah z (k_z)

$$k_z = \frac{Z}{(z_1 / k_1) + \dots + (z_n / k_n)} \quad (3.18)$$

b. permeabilitas ekuivalen arah x (k_x)

$$k_x = \frac{(z_1 \cdot k_1) + \dots + (z_n \cdot k_n)}{Z} \quad (3.19)$$

c. permeabilitas efektif (k)

$$k = \sqrt{k_x \cdot k_z} \quad (3.20)$$

Notasi :

Z = ketebalan total lapisan (cm)

n = jumlah lapisan

z_n = ketebalan lapisan ke- n (cm)

k_n = permeabilitas lapisan ke- n (cm/dt)

3.2.5 Penurunan (*Settlement*)

Analisis penurunan dimaksudkan untuk memperkirakan penurunan suatu konstruksi sebagai akibat tanah yang mengalami konsolidasi. Pada umumnya tanah lempung penurunannya jauh lebih besar dibandingkan dengan pasir atau lanau (Soedarmo & Purnomo, 1997).

Penurunan terdiri dari penurunan segera (*immediate settlement*), penurunan pertama konsolidasi (*primary consolidation settlement*) dan penurunan kedua konsolidasi/rangkak (*secondary consolidation settlement/creep*). Pada lapisan tanah lempung penurunan yang lebih dominan terjadi adalah penurunan akibat pertama konsolidasi, walaupun penurunan segera dan kedua konsolidasi juga terjadi.

Pada penelitian ini yang diperhitungkan penurunan maksimum akibat pertama konsolidasi dengan rumusan :

$$S = mv \cdot H \cdot \sigma_p \quad (3.21)$$

Notasi :

S = penurunan maksimum (m)

mv = koefisien perubahan volume (m^3/kN)

H = tebal lapisan tanah (m)

σ_p = tegangan efektif akibat pembebanan (kN/m^2)

3.2.6 Perhitungan Debit Air

Debit air adalah volume air atau jumlah air yang lewat per satuan waktu. Debit air ditentukan oleh luasan yang dilewati dan kecepatan aliran dalam lapisan tersebut. Permeabilitas lapisan dikalikan dengan gradien hidrolik menentukan kecepatan aliran atau dikenal dengan rumus Darcy (Daruslan, 1994).

$$Q_a = A \cdot v \quad (3.22)$$

dimana :

$$v = k \cdot i \quad (3.23)$$

sehingga dirumuskan :

$$Q_a = A \cdot k \cdot i \quad (3.24)$$

Notasi :

Q_a = debit air (cm^3/dt)

A = luas area (cm^2)

v = kecepatan aliran (cm/dt)

k = permeabilitas lapisan (cm/dt)

i = gradien hidrolik

- arah vertikal (z), $i = (h/Z)$

- arah horisontal (x), $i = (h/l)$

h = selisih aliran air (cm)

Z = tebal total lapisan (cm)

l = lebar total lapisan (cm)

3.3 Analisis Pondasi Tiang Pancang

3.3.1 Tinjauan Terhadap Tahanan Ujung (*End Bearing Pile*)

Tiang pancang yang dihitung berdasarkan pada tahanan ujung (*end bearing pile*) ini dipancang sampai pada lapisan keras, yang mampu memikul beban yang diterima oleh tiang pancang tersebut. Untuk menghitung gaya perlawanan lapisan tanah keras tersebut terhadap ujung tiang cara yang paling banyak dipakai adalah dengan alat sondir. Kemampuan tiang untuk menahan beban yang bekerja ditinjau terhadap :

a. Kekuatan bahan tiang

$$P_t = \sigma_b \cdot A_t \quad (3.25)$$

Notasi :

P_t = kekuatan yang diijinkan (kg)

σ_b = tegangan tekan ijin bahan tiang (kg/cm^2)

A_t = luas penampang tiang (cm^2)

b. Kekuatan tanah

1) berdasarkan konus

$$Q_t = \frac{A_t \cdot p}{3} \quad (3.26)$$

Notasi :

Q_t = daya dukung keseimbangan tiang (kg)

A_t = luas penampang tiang (cm^2)

p = nilai konus dari hasil sondir (kg/cm^2)

3 = angka keamanan

Nilai konus yang dipakai untuk menentukan daya dukung tiang diambil rata-rata dari hasil konus pada kedalaman 4D diatas ujung bawah tiang dan 4D dibawah ujung tiang dengan D adalah ukuran diameter tiang (Wesley, 1977).

2) Dengan perumusan Terzaghi

$$Q_t = \frac{A_t \cdot q}{3} \quad (3.27)$$

Notasi :

Q_t = daya dukung keseimbangan tiang (kg)

A_t = luas penampang tiang (cm^2)

q = daya dukung keseimbangan tiang (kg/cm^2)

3 = angka keamanan

3.3.2 Tinjauan Terhadap Gaya Gesekan (*Friction Pile*)

Daya dukung berdasarkan pelekatan antara tiang dengan tanah (*cleef*) apabila lapisan tanah keras letaknya sangat dalam atau memancangkan tiang pada lapisan tanah lempung. Dalam hal ini perlawanan pada ujung tiang akan jauh lebih kecil daripada perlawanan akibat pelekatan antara tiang dengan tanah. Besarnya gaya pelekatan antara tiang dengan tanah dapat diukur dengan percobaan sondir yang memakai alat *biconus*, kemampuan tiangnya adalah :

1) Berdasarkan hasil sondir (*cleef*)

$$Q_t = \frac{0 \cdot L \cdot c}{5} \quad (3.28)$$

Notasi :

Q_t = daya dukung tiang (kg)

0 = keliling tiang (cm)

L = panjang tiang yang masuk dalam tanah (cm)

c = harga *cleef* rata-rata (kg/cm^2)

5 = angka keamanan

2) Secara teoritis dengan perumusan (Wesley, 1977)

$$Q_t = (C \cdot N_c \cdot A) + (0 \cdot L \cdot c \cdot K) \quad (3.29)$$

Notasi :

Q_t = daya dukung tiang (kg)

A_t = luas penampang tiang (cm^2)

O = keliling tiang (cm)

L = panjang tiang yang masuk dalam tanah (cm)

C = harga kohesi tanah (kg/cm^2)

c = harag *cleef* rata-rata (kg/cm^2)

N_c = faktor daya dukung pondasi

K = perbandingan antara gaya pelekatan dengan kohesi tanah ($K=1$).

3.3.3 Tinjauan Terhadap *End Bearing Pile* dan *Friction Pile*

Perhitungan berdasarkan tahanan ujung dan pelekatan antara tiang dengan tanah apabila tiang dipancang sampai kedalaman tanah keras melalui lapisan tanah lempung. Kemampuan tiang ditinjau terhadap :

a. kekuatan bahan tiang

$$P_t = \sigma_b \cdot A_t \quad (3.30)$$

Notasi :

P_t = kekuatan yang diijinkan (kg)

σ_b = tegangan tekan ijin bahan tiang (kg/cm^2)

A_t = luas penampang tiang (cm^2)

b. kekuatan tanah

1) beban sementara :

$$Q_t = \frac{A_t \cdot p}{2} + \frac{0 \cdot L \cdot c}{5} \quad (3.31)$$

2) beban tetap/statis :

$$Q_t = \frac{A_t \cdot p}{3} + \frac{0 \cdot L \cdot c}{5} \quad (3.32)$$

3) beban dinamis :

$$Q_t = \frac{A_t \cdot p}{5} + \frac{0 \cdot L \cdot c}{8} \quad (3.33)$$

Notasi :

Q_t = daya dukung tiang (kg)

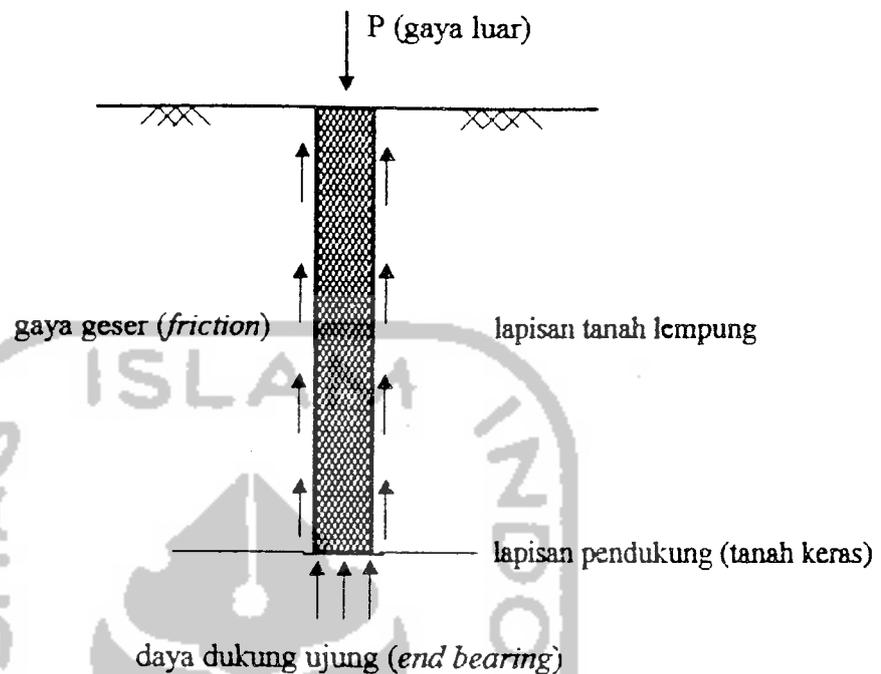
A_t = luas penampang tiang (cm^2)

p = nilai konus dari hasil sondir (kg/cm^2)

0 = keliling tiang (cm)

L = panjang tiang yang masuk dalam tanah (cm)

c = harga *cleef* rata-rata (kg/cm^2)



Gambar 3.2 Mekanisme daya dukung tiang (Sosrodarsono, Nakazawa, 1983)

3.3.4 Pondasi Tiang Kelompok (*Pile Group*)

a. Kapasitas Dukung Tiang Kelompok

Setiap tiang dalam satu kelompok *pile cap* sebagai akibat beban sentris di atasnya akan mengalami penurunan yang sama, sehingga dapat dianggap bahwa setiap tiang akan mendukung beban yang sama pula. Perhitungan kapasitas dukung kelompok tiang berdasarkan perhitungan daya dukung tanah oleh Direktorat Jendral Bina Marga Departemen P.U.T.L. (Sardjono HS., 1996). Perumusan untuk pondasi akibat perlawanan geser (*shear resistance*) pada permukaan luar keliling kelompok tiang adalah :

$$Q_t = C \cdot N_c \cdot A + 2(B + Y) \cdot L \cdot c \cdot K \quad (3.34)$$

daya dukung tiang kelompok :

$$Q_{pg} = (C \cdot N_c \cdot A) / 3 + (2 (B + Y) \cdot L \cdot c \cdot K) / 5 \quad (3.35)$$

Notasi :

Q_c = daya dukung keseimbangan pada kelompok tiang (kg)

Q_{pg} = daya dukung yang diijinkan pada kelompok tiang (kg)

C = harga kohesi tanah (kg/cm^2)

L = panjang tiang dalam tanah (m)

c = harga *cleef* rata-rata (kg/cm^2)

A = luas kelompok tiang (m^2)

B = lebar kelompok tiang (m)

Y = panjang kelompok tiang (m)

3, 5 = angka keamanan (SF)

N_c = faktor daya dukung pondasi

K = perbandingan gaya pelekatan dengan kohesi tanah ($K = 1$)

Harga N_c menurut Skempton, 1951 dirumuskan :

$$N_c = (1 + 0,2 (B / Y)) \cdot N_{cs} \quad (3.36)$$

dimana :

N_{cs} adalah nilai N_c untuk perbandingan kedalaman dan lebar pondasi (H/B) yang dapat dilihat pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Harga N_{cs} untuk H/B menurut Skempton, 1951

Perbandingan H/B	N_{cs}
0	6,2
0,5	7,1
1	7,6
1,5	8,4
2	8,6
3	9,1
4	9,3
74	9,3

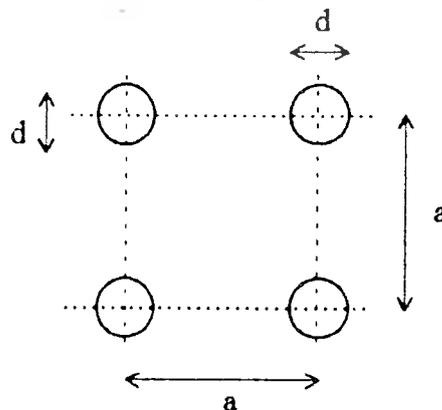
b. Jarak Antara Tiang Kelompok

Jarak antara tiang dalam kelompok sangat mempengaruhi perhitungan kapasitas dukung dari tiang kelompok. Untuk bekerja sebagai tiang kelompok jarak antara tiang (a) ini, biasanya harus memenuhi peraturan-peraturan bangunan pada daerah masing-masing. Pada umumnya jarak antara tiang (a) bervariasi antara :

- jarak minimum $a = 2d$

- jarak maksimum $a = 6d$

Berdasarkan daya dukung tanah oleh Direktorat Jendral Bina Marga Departemen P.U.T.L. disyaratkan yaitu jarak antara tiang $a \geq 2,5d$ atau $a \geq 3,0d$.



Gambar 3.3 Jarak antara tiang dalam tiang kelompok (Sardjono HS., 1996)