

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Tanah

Tanah dari pandangan ilmu Teknik Sipil merupakan himpunan mineral, bahan organik dan endapan-endapan yang relative lepas (*loose*) yang terletak di atas batu dasar (*bedrock*) (Hardiyatmo, 1992). Tanah didefinisikan secara umum adalah kumpulan dari bagian-bagian yang padat dan tidak terikat antara satu dengan yang lain (diantaranya mungkin material organik) rongga-rongga diantara material tersebut berisi udara dan air (Verhoef,1994).

Ikatan antara butiran yang relatif lemah dapat disebabkan oleh karbonat, zat organik, atau oksida-oksida yang mengendap-ngendap diantara partikel-partikel. Ruang diantara partikel-partikel dapat berisi air, udara, ataupun yang lainnya (Hardiyatmo, 1992). Proses penghancuran dalam pembentukan tanah dari batuan terjadi secara fisis atau kimiawi. Proses fisis antara lain berupa erosi akibat tiupan angin, pengikisan oleh air dan *glatsyer*, atau perpecahan akibat pembekuan dan pencairan es dalam batuan sedangkan proses kimiawi menghasilkan perubahan pada susunan mineral batuan asalnya. Salah satu penyebabnya adalah air yang mengandung asam alkali, oksigen dan karbondioksida (Wesley, 1977).

Sedangkan pengertian tanah menurut Bowles (1984), tanah adalah campuran partikel-partikel yang terdiri dari salah satu atau seluruh jenis berikut.

1. Berangkal (*boulders*) adalah potongan batuan yang besar, biasanya lebih besar dari 250 sampai 300 mm dan untuk ukuran 150 mm sampai 250 mm.
2. Kerikil (*gravel*) adalah partikel batuan yang berukuran 5 mm sampai 150 mm.

3. Pasir (*sand*) adalah partikel batuan yang berukuran 0,074 mm sampai 5 mm, yang berkisar dari kasar dengan ukuran 3 mm sampai 5 mm sampai bahan halus yang berukuran < 1 mm.
4. Lanau (*silt*) adalah partikel batuan yang berukuran dari 0,002 mm sampai 0,0074 mm.
5. Lempung (*clay*) adalah partikel mineral yang berukuran lebih kecil dari 0,002 mm yang merupakan sumber utama dari kohesi pada tanah yang kohesif.
6. Koloid (*colloids*) adalah partikel mineral yang diam dan berukuran lebih kecil dari 0,001 mm.

3.2 Pondasi Tiang

Pondasi adalah bagian terendah dari bangunan yang meneruskan beban bangunan ke tanah dan batuan yang ada dibawahnya. Terdapat dua klasifikasi pondasi, yaitu pondasi dangkal dan pondasi dalam. Pondasi dangkal didefinisikan sebagai pondasi yang mendukung bebannya secara langsung, seperti: pondasi telapak. Pondasi dalam didefinisikan sebagai pondasi yang meneruskan beban bangunan ke tanah keras atau batuan yang terletak relatif jauh dari permukaan, contohnya pondasi sumuran dan pondasi tiang (Hardiyatmo, 2014).

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 yang terdapat di bawah konstruksi, dengan tumpuan pondasi (Sosrodarsono-K, Nakazawa, 2002).

Pondasi tiang digunakan untuk mendukung bangunan bila lapisan tanah kuat terletak sangat dalam. Pondasi jenis ini dapat juga digunakan untuk mendukung bangunan yang menahan gaya angkat ke atas, terutama pada bangunan-bangunan tingkat tinggi yang dipengaruhi oleh gaya-gaya penggulingan akibat beban angin. Tiang-tiang juga digunakan untuk mendukung bangunan dermaga. Pada bangunan ini, tiang-tiang dipengaruhi oleh gaya-gaya benturan kapal dan gelombang air.

Adapun maksud dan tujuan dari penggunaan pondasi tiang yaitu sebagai berikut (Hardiyatmo, 2008).

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

Pondasi tiang dapat dibagi menjadi 3 kategori sebagai berikut.

- a. Tiang perpindahan besar (*large displacement pile*), yaitu tiang pejal atau berlubang dengan ujung tertutup yang dipancang ke dalam tanah sehingga terjadi perpindahan volume tanah yang relatif besar. Termasuk dalam tiang perpindahan besar adalah tiang kayu, tiang beton pejal, tiang beton prategang (pejal atau berlubang), tiang baja bulat (tertutup pada ujungnya).
- b. Tiang perpindahan kecil (*small displacement pile*) adalah sama seperti tiang kategori pertama hanya volume tanah yang dipindahkan saat pemancangan relatif kecil, contohnya: tiang beton berlubang dengan ujung terbuka, tiang beton prategang berlubang dengan ujung terbuka, tiang baja H, tiang baja bulat ujung terbuka, tiang ulir.
- c. Tiang tanpa perpindahan (*non displacement pile*) terdiri dari tiang yang dipasang di dalam tanah dengan cara menggali atau mengebor tanah. Termasuk dalam tiang tanpa perpindahan adalah tiang bor, yaitu tiang beton

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

3.3 Tiang Beton

1. Tiang beton pracetak

Tiang beton pracetak umumnya berbentuk prisma atau bulat. Tiang-tiang dicetak di lokasi tertentu, kemudian diangkut ke lokasi pembangunan.. Untuk tiang yang berlubang diameternya dapat mencapai 140 cm. Panjang tiang beton pracetak biasanya berkisar diantara 20 sampai 40 m. Untuk tiang beton berlubang bisa sampai 60 m..

2. Tiang beton cetak ditempat

Tiang beton cetak di tempat terdiri dari 2 tipe yaitu:

a. Tiang yang berselubung pipa

Pada tiang yang berselubung pipa, pipa baja dipancang lebih dulu ke dalam tanah. Kemudian, ke dalam lubang dimasukkan adukan beton. Pada akhirnya nanti, pipa besi tetap tinggal di dalam tanah. Termasuk jenis tiang ini adalah tiang *Standar Raimond*.

b. Tiang yang tidak berselubung pipa

Pada tiang yang tidak berselubung pipa, pipa baja yang berlubang dipancang lebih dulu ke dalam tanah. Kemudian ke dalam lubangnya dimasukkan adukan beton dan pipa ditarik keluar ketika atau sudah pengecoran. Termasuk jenis tiang ini adalah tiang *Franki*.

3.4 Alat Pancang Tiang

Dalam pemasangan tiang ke dalam tanah, tiang dipancang dengan alat pemukul yang dapat berupa pemukul (*hammer*) mesin uap, pemukul getar atau pemukul yang hanya dijatuhkan. Skema dari berbagai macam alat pemukul diperlihatkan dalam gambar. Pada gambar tersebut diperlihatkan pula alat-alat perlengkapan pada kepala tiang dalam pemancangan.

Penutup tiang (*pile cap*) biasanya diletakkan menutup kepala tiang yang kadang-kadang dibentuk dalam geometri tertutup. Tiang dan pemukul dipasang pada peralatan *crane* yang dilengkapi dengan rangka batang baja sebagai pengatur jatuhnya pemukul ke kepala tiang yang disebut *lead* (Hardiyatmo, 2008).

1. Pemukul jatuh (*drop hammer*)

Pemukul jatuh terdiri dari blok pemberat yang dijatuhkan dari atas. Pemberat ditarik dengan tinggi jatuh tertentu kemudian dilepas dan menumbuk tiang. Pemakaian alat tipe ini membuat pelaksanaan pemancangan berjalan lambat, sehingga alat ini hanya dipakai pada volume pekerjaan pemancangan yang kecil.

2. Pemukul aksi tunggal (*single-acting hammer*)

Pemukul aksi tunggal berbentuk memanjang dengan *ram* yang bergerak naik oleh udara atau uap yang terkompresi, sedangkan gerakan turun *ram* disebabkan oleh beratnya sendiri. Energi pemukul aksi tunggal adalah sama dengan berat ram dikalikan tinggi jatuhnya. Adapun gambar pemukul aksi tunggal bisa dilihat pada Gambar 3.1 berikut ini.



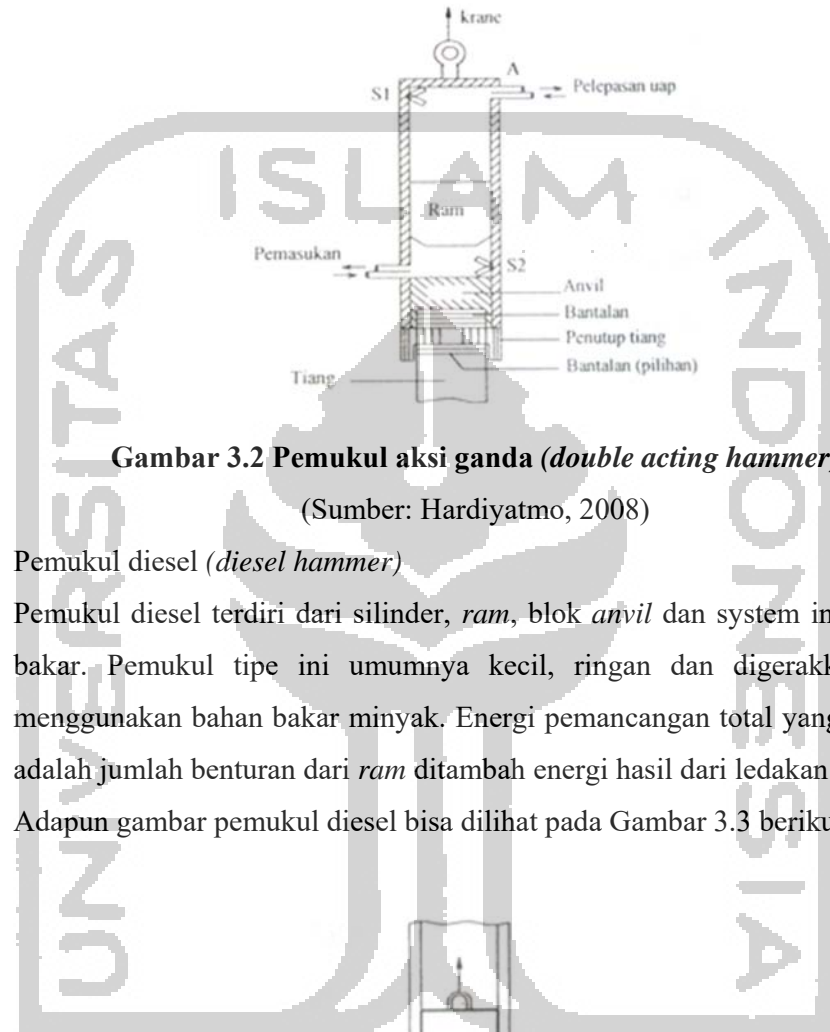
Gambar 3.1 Pemukul aksi tunggal (*single acting hammer*)

(Sumber: Hardiyatmo, 2008)

3. Pemukul aksi ganda (*double-acting hammer*)

Pemukul aksi ganda menggunakan uap atau udara untuk mengangkat *ram* dan untuk mempercepat gerakan ke bawahnya. Kecepatan pukul dan energi *output*

biasanya lebih tinggi daripada pemukul aksi tunggal. Adapun gambar pemukul aksi ganda bisa dilihat pada Gambar 3.2 berikut ini.



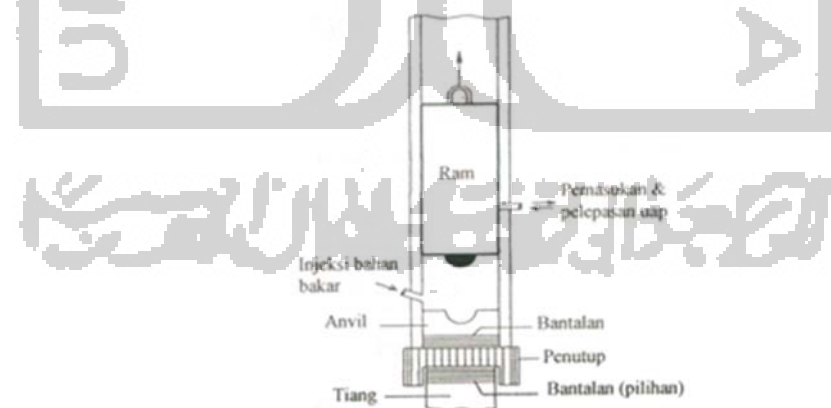
Gambar 3.2 Pemukul aksi ganda (*double acting hammer*)

(Sumber: Hardiyatmo, 2008)

4. Pemukul diesel (*diesel hammer*)

Pemukul diesel terdiri dari silinder, *ram*, blok *anvil* dan system injeksi bahan bakar. Pemukul tipe ini umumnya kecil, ringan dan digerakkan dengan menggunakan bahan bakar minyak. Energi pemancangan total yang dihasilkan adalah jumlah benturan dari *ram* ditambah energi hasil dari ledakan.

Adapun gambar pemukul diesel bisa dilihat pada Gambar 3.3 berikut ini.

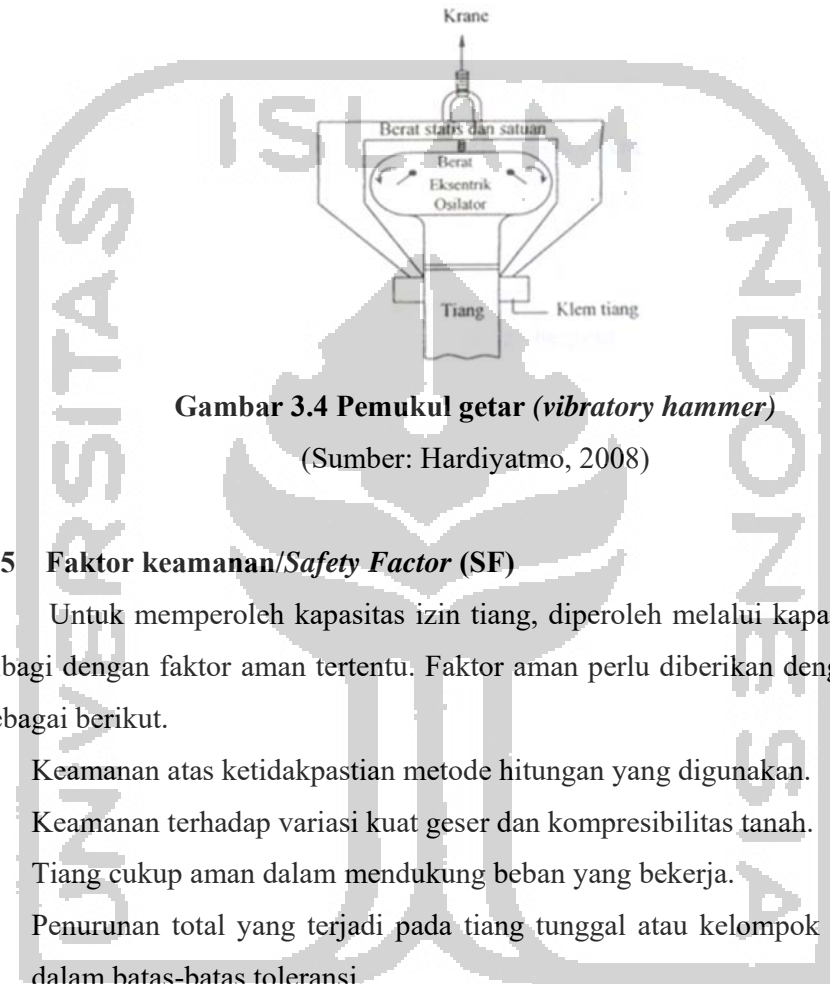


Gambar 3.3 Pemukul diesel (*diesel hammer*)

(Sumber: Hardiyatmo, 2008)

5. Pemukul getar (*vibratory hammer*)

Pemukul getar merupakan unit alat pancang yang bergetar pada frekuensi tinggi. Adapun gambar pemukul getar bisa dilihat pada Gambar 3.4 berikut ini.



Gambar 3.4 Pemukul getar (*vibratory hammer*)

(Sumber: Hardiyatmo, 2008)

3.5 Faktor keamanan/*Safety Factor* (SF)

Untuk memperoleh kapasitas izin tiang, diperoleh melalui kapasitas ultimit dibagi dengan faktor aman tertentu. Faktor aman perlu diberikan dengan maksud sebagai berikut.

1. Keamanan atas ketidakpastian metode hitungan yang digunakan.
2. Keamanan terhadap variasi kuat geser dan kompresibilitas tanah.
3. Tiang cukup aman dalam mendukung beban yang bekerja.
4. Penurunan total yang terjadi pada tiang tunggal atau kelompok masih tetap dalam batas-batas toleransi.

Adapun untuk nilai factor yang disarankan bisa dilihat pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Faktor aman yang disarankan (Reese & O'Neill, 1989)

Klasifikasi Struktur	Faktor Keamanan (Safety Factor, SF)			
	Kontrol Baik	Kontrol Aman	Kontrol Jelek	Kontrol Sangat Jelek
Monumental	2,3	3	3,5	4
Permanen	2	2,5	2,8	3,4
Sementara	1,4	2	2,3	2,8

Sumber: Hardiyatmo (2008)

Besarnya beban kerja (*working load*) atau kapasitas tiang izin (Qa) dengan memperhatikan keamanan terhadap keruntuhan adalah nilai kapasitas ultimit (Qu) dibagi dengan faktor aman (F) yang sesuai.

Variasi faktor aman yang telah banyak digunakan untuk perancangan pondasi tiang pancang, ada pada Persamaan 3.1 sebagai berikut.

1. Tiang pancang

$$Qa = \frac{Qu}{2,5} \quad (3.1)$$

Beberapa peneliti menyarankan faktor aman yang tidak sama untuk tahanan gesek dinding dan tahanan ujung. Kapasitas izin dinyatakan dalam persamaan ada pada Persamaan 3.2 sebagai berikut.

$$Qa = \frac{Qb}{3} + \frac{Qs}{1,5} \quad (3.2)$$

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

2. Tiang bor

- a. untuk dasar tiang yang dibesarkan dengan $d < 2$ m ada pada Persamaan 3.3 sebagai berikut.

$$Qa = \frac{Qu}{2,5} \quad (3.3)$$

- b. untuk dasar tiang tanpa pembesaran dibagian bawah ada pada Persamaan 3.4 sebagai berikut.

$$Qa = \frac{Qu}{2} \quad (3.4)$$

Untuk diameter tiang (D) lebih dari 2 m, kapasitas tiang izin perlu dievaluasi dari pertimbangan penurunan tiang. Selanjutnya, penurunan

struktur harus pula dicek terhadap persyaratan besar penurunan toleransi yang masih dijalankan.

3.6 Pembebanan

Dalam analisa pembebanan mengacu pada SNI 1729-2013, SNI 1729-1989, dan PPIUG 1983 yang menyatakan bahwa beban-beban yang bekerja meliputi: beban mati, beban hidup, beban angin, beban hujan dan beban gempa. Semua jenis pembebanan dimodelkan dengan bantuan program SAP2000. Beban-beban tersebut kemudian dikombinasikan untuk mendapatkan beban terfaktor maksimum yang mana konfigurasi pembebanan yang benar sangatlah vital adanya dalam proses perancangan fondasi. Berikut ini adalah beban-beban yang berkerja pada gedung Sekolah SMP Negeri 7 Tarakan.

1. $1,4D$
2. $1,2D + 1,6L + 0,5(Lr \text{ atau } R)$
3. $1,2D + 1,6(Lr \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5W)$
4. $1,2D + 1,0W + L + 0,5(Lr \text{ atau } R)$
5. $1,2D + 1,0E + L$
6. $0,9D + 1,0W$
7. $0,9D + 1,0E$

Juga digunakan respon spektrum, adapun respons spektrum adalah suatu spektrum yang disajikan dalam bentuk grafik/plot antara periode getar struktur T , lawan respon-respon maksimum berdasarkan rasio redaman dan gempa tertentu. Respon-respon maksimum dapat berupa simpangan maksimum (*spectral displacement, SD*) kecepatan maksimum (*spectral velocity, SV*) atau percepatan maksimum (*spectral acceleration, SA*) massa struktur *single degree of freedom (SDOF)*, (Widodo, 2001).

3.7 Kapasitas Daya Dukung Tiang Pancang

Hitungan kapasitas tiang secara statis dilakukan menurut teori Mekanika Tanah, yaitu dengan mempelajari sifat-sifat teknis tanah. Biasanya menggunakan

data hasil pengujian sondir/CPT dan NSPT. Sedangkan hitungan kapasitas tiang dengan cara dinamis dilakukan dengan menganalisis kapasitas ultimit dengan data yang diperoleh dari data pemancangan tiang seperti data hasil PDA *test* dan kalendaring.

3.7.1 Kapasitas daya dukung dengan metode statis

Berikut adalah metode perhitungan kapasitas daya dukung tiang pancang dengan metode statis berdasarkan data sondir/*Cone Penetration Test* (CPT).

1. Metode Mayerhof

Kapasitas daya dukung dan daya dukung izin pondasi tiang berdasarkan data sondir/CPT dengan menggunakan metode Mayerhoff ada pada Persamaan 3.5 dan 3.6 sebagai berikut ini.

Daya dukung pondasi tiang pancang

$$Q_{ult} = (q_c \times A_p) + (JHL \times K) \quad (3.5)$$

Daya dukung izin pondasi

$$Q_{izin} = \frac{q_c \times A_p}{3} + \frac{JHL \times K}{5} \quad (3.6)$$

Dimana:

Q_{ult} = kapasitas daya dukung tiang (kg)

q_c = tahanan ujung (kg/cm^2)

A_p = luas penampang tiang (cm^2)

JHL = jumlah hambatan lekat (kg/cm)

K = keliling tiang (cm)

2. Metode EN 1997-2

Adapun metode EN-1997 -2 adalah metode yang digunakan untuk mengetahui daya dukung ultimit tiang dengan cara mendapatkan nilai tekanan maksimum pada ujung tiang $p_{max,toe}$ dengan rumus demikian pada Persamaan 3.7 sebagai berikut.

$$P_{max,toe} = 0.5 \cdot a_p \cdot \beta \cdot s \cdot \left(\frac{q_{c,I,m} + q_{c,II,m}}{2} + q_{c,III,m} \right) \quad (3.7)$$

Dimana :

$q_{c,I,m}$: nilai rata-rata $q_{c,I}$

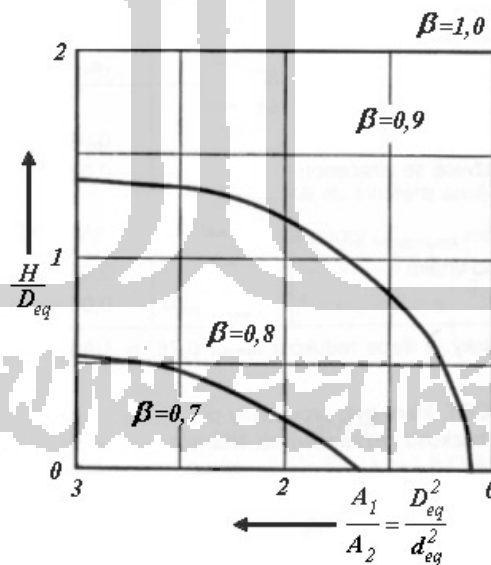
- $q_{c,II,m}$: nilai minimum dari perlawanan konus
 $q_{c,III,m}$: nilai rata-rata dari perlawanan konus
 α_p : koefisien ujung tiang
 s : koefisien bentuk tiang
 β : koefisien ujung tiang yang ditambahkan

Dimana untuk nilai α_p bisa dilihat pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Koefisien Ujung Tiang EN 1997-2

Piles	Ap
Prefabricated driven piles or steel piles	1
Franki Pile	1
Driving Wooden Pile	1
Vibrating	1
Cast in Place Screw Piles	0.9

Sementara untuk nilai s dipakai 1 untuk jenis tiang yang berbentuk silinder dan untuk nilai koefisien ujung tiang yang ditambahkan bisa didapat dari grafik pada Gambar 3.5 sebagai berikut.



Gambar 3.5 Grafik koefisien ujung tiang yang ditambahkan

(Sumber : EN 1997-2 Guide, 2017)

3.7.2 Kapasitas daya dukung dengan metode dinamis

Hitungan kapasitas daya dukung tiang dengan metode dinamis didasarkan pada rumus tiang pancang dinamis. Rumus ini hanya berlaku untuk tiang tunggal dan tidak memperhatikan hal-hal sebagai berikut.

1. Kelakukan tanah yang terletak di bawah dasar kelompok tiang dalam mendukung beban struktur.
2. Reduksi tanah gesek dinding tiang sebagai akibat pengaruh kelompok tiang.
3. Perubahan struktur tanah akibat pemancangan.

Karena itu, data hasil pengujian hanya digunakan sebagai salah satu informasi pemancangan tiang, yang selanjutnya masih harus dipertimbangkan terhadap kondisi-kondisi yang lain supaya hasilnya lebih meyakinkan.

Berikut adalah metode perhitungan kapasitas daya dukung tiang pancang dengan metode dinamis berdasarkan data kalendaring.

a. Metode Hilley

Untuk Metode Hilley ada pada Persamaan 3.8 sebagai berikut.

$$Q_u = \frac{e_h W_r h}{s + 1/2(k_1 + k_2 + k_3)} \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} \quad (3.8)$$

Dimana:

Q_u = daya dukung izin ultimit

e_h = efisiensi pemukul (*hammer efficiency*)

W_r = berat ram (untuk pemukul aksi *double* termasuk berat *casing*)

h = tinggi jatuh pemukul

n = koefisien restitusi

W_p = berat tiang termasuk beton penutup tiang (*pile cap*), *driving shoe* dan blok penutup (*cap block*) (juga termasuk *anvil* untuk pemukul uap aksi *double*) (F)

s = penetrasi per pukulan

Nilai-nilai k_i yang digunakan pada persamaan 3.10 dapat dilihat pada Tabel 3.3. Nilai efisiensi pemukul (e_h), jika belum ada data yang tepat, nilai-nilai e_h dalam Tabel 3.4 dapat dipakai sebagai acuan. Nilai-nilai koefisien restitusi n

ditunjukkan dalam Tabel 3.5, dimana nilai-nilai bergantung pada tipe dan kondisi bahan *cap block* dan bantalan kepala tiang, nilai k_3 dapat diambil (Bowles, 1982) sebagai berikut.

$k_3 = 0$ untuk tanah keras (batu, pasir, sangat padat dan kerikil).

$k_3 = 0,1$ sampai $0,2$ atau $2,5$ sampai 5 mm untuk tanah-tanah yang lain.

Tabel 3.3 Nilai-nilai k_1

Bahan tiang	Nilai-nilai k_1 (mm), untuk tegangan akibat pukulan pemancangan di kepala tiang			
	3,5 MPa	7,0 MPa	10,5 MPa	14 MPa
Tiang baja atau pipa langsung pada kepala tiang	0	0	0	0
Tiang kayu langsung pada kepala tiang	1,3	2,5	3,8	5
Tiang beton pracetak dengan 75-100 mm bantalan di cap	3	6	9	12,5
Baja tertutup <i>cap</i> yang berisi bantalan kayu untuk tiang baja H atau tiang pipa	1	2	3	4

Sumber: Hardiyatmo (2008)

Tabel 3.4 Nilai efisiensi eh

Tipe	Efisiensi eh
Pemukul jatuh (<i>drop hammer</i>)	0,75 - 1
Pemukul aksi tunggal (<i>single acting hammer</i>)	0,75 - 0,85
Pemukul aksi dobel (<i>double acting hammer</i>)	0,85
Pemukul diesel (<i>diesel hammer</i>)	0,85 - 1

Sumber: Hardiyatmo (2008)

Tabel 3.5 Koefisien restitusi n

Material	n
<i>Broomed wood</i>	0
Tiang kayu (ujung tidak rusak)	2,5
Bantalan kayu padat pada tiang baja	0,32
Bantalan kayu padat di atas tiang baja	0,4
Landasan baja pada baja (<i>steel on steel anvil</i>), pada tiang baja atau beton	0,5
Pemukul besi cor pada tiang beton tanpa penutup (<i>cap</i>)	0,4

Sumber: Hardiyatmo (2008)

b. Metode *Engineering New Records* (ENR)

Rumus ENR didasarkan pada penggunaan satu faktor kehilangan energi saja dan dengan mengambil faktor $eh = 1$, untuk pemukul jatuh dan pemukul tenaga uap ada pada Persamaan 3.9 dan 3.10 sebagai berikut.

1) Pemukul jatuh (*drop hammer*)

$$Qu = \frac{W_r h}{s+2,5} \quad (3.9)$$

2) Pemukul tenaga uap (*steam hammer*)

$$Qu = \frac{W_r h}{s+0,25} \quad (3.10)$$

Dengan $Qa = Qu/F =$ kapasitas izin tiang dengan faktor aman untuk rumus ENR, $F = 6$. dalam persamaan ini, satuan panjang (h dan s) yang dipakai adalah cm dan satuan berat Wr dalam kg. Pada tahun-tahun terakhir rumus ENR dimodifikasi ada pada Persamaan 3.11 sebagai berikut.

$$Qu = \frac{e_h W_r h (W_r + n^2 W_p)}{(s+0,25)(W_r + W_p)} \quad (3.11)$$

Dimana:

Qu = daya dukung izin ultimit

Eh = efisiensi pemukul (*hammer efficiency*)

Wr = berat ram (untuk pemukul aksi *double* termasuk berat *casing*)

h = tinggi jatuh pemukul

n = koefisien restitusi

Wp = berat tiang termasuk beton penutup tiang (*pile cap*), *driving*

s = penetrasi per pukulan

c. Rumus Janbu (1953)

Rumus yang disarankan oleh Janbu (1953) ada pada persamaan 3.12 dan Ku, Cd dan A ada pada Persamaan 3.13, 3.14, dan 3.15 sebagai berikut.

$$Qu = \frac{e_h W_r h}{K_u s} \quad (3.12)$$

dengan,

$$Ku = C_d \left[1 + \left(1 + \frac{\lambda}{C_d} \right)^{1/2} \right] \quad (3.13)$$

$$C_d = 0,75 + 0,15 \left(\frac{W_p}{W_r} \right) \quad (3.14)$$

$$\lambda = \frac{e_h E_h L}{A E S} \quad (3.15)$$

Dimana:

Q_u = daya dukung izin ultimit

e_h = efisiensi pemukul (*hammer efficiency*)

W_r = berat ram (untuk pemukul aksi *double* termasuk berat *casing*)

h = tinggi jatuh pemukul

n = koefisien restitusi

W_p = berat tiang termasuk beton penutup tiang (*pile cap*)

E_h = besaran energi pemukul dari pabrik

L = panjang tiang

A = tampang melintang tiang

E = modulus elastis bahan tiang

S = penetrasi per pukulan

Dengan s adalah penetrasi terakhir (m) yaitu digunakan nilai rata-rata 5 pukulan terakhir untuk pemukul yang cara pemukulannya dijatuhkan dan 20 pukulan untuk jenis yang lain. Pada rumus *Janbu*, F diambil 3 sampai 6. penyelidikan-penyelidikan secara teliti untuk tiang yang dipancang dalam tanah granuler menunjukkan bahwa faktor aman 2,7 cukup baik digunakan dalam rumus *Hilley* dan faktor aman 3,0 untuk rumus *Janbu*. Terzaghi dan Peck (1967) menyarankan untuk menggunakan rumus *Janbu* pada proyek kecil. Nilai kapasitas izin ditentukan dengan cara membagi kapasitas ultimit yang diperoleh dengan faktor aman 3, dengan resiko bahwa pada kenyataannya faktor aman mungkin hanya 1,75.

3.8 Tiang Pancang Kelompok Tiang

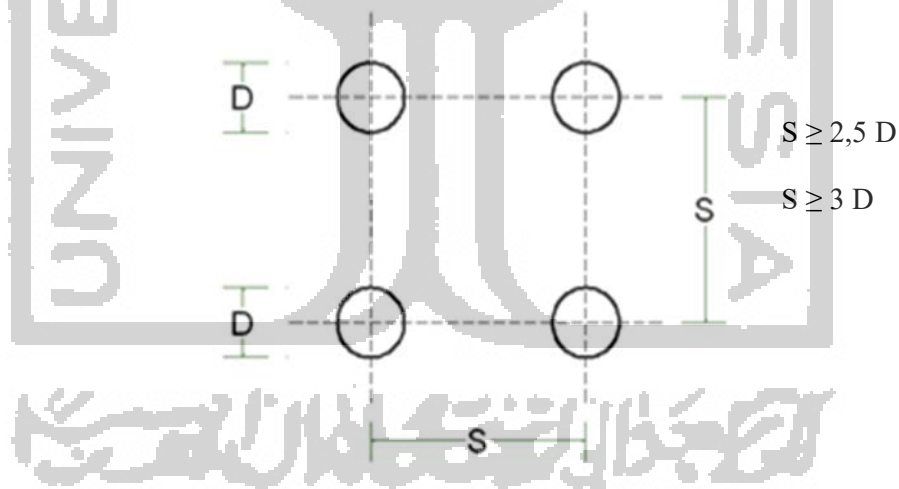
Pada keadaan sebenarnya jarang sekali kita dapati tiang pancang yang berdiri sendiri (*Single Pile*), akan tetapi kita sering mendapatkan pondasi tiang pancang dalam bentuk kelompok (*Pile Group*).

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

1. 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.

3.8.1 Jarak antar tiang dalam kelompok

Berdasarkan pada perhitungan Daya dukung tanah oleh Dirjen Bina Marga Departemen P.U.T.L. diisyaratkan, adapun syarat jarak antar tiang tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.6 sebagai berikut.



Gambar 3.6 Syarat Jarak Antar Tiang

(Sumber: Hardiyatmo, 2008.)

Dimana:

S = jarak masing-masing.

D = diameter tiang.

Biasanya jarak antara 2 tiang dalam kelompok diisyaratkan minimum 0,60 m dan maximum 2,00 m. Ketentuan ini berdasarkan pada pertimbangan-pertimbangan sebagai berikut.

1. Bila $S < 2,5 D$

Pada pemancangan tiang no. 3 (Gambar 2.3) akan menyebabkan:

- a. Kemungkinan tanah di sekitar kelompok tiang akan naik terlalu berlebihan karena terdesak oleh tiang-tiang yang dipancang terlalu berdekatan.
- b. Terangkatnya tiang-tiang di sekitarnya yang telah dipancang lebih dahulu.

2. Bila $S > 3 D$

Apabila $S > 3 D$ maka tidak ekonomis, karena akan memperbesar ukuran/dimensi dari poer (footing).

Pada perencanaan pondasi tiang pancang biasanya setelah jumlah tiang pancang dan jarak antara tiang-tiang pancang yang diperlukan kita tentukan, maka kita dapat menentukan luas poer yang diperlukan untuk tiap-tiap kolom portal.

Bila ternyata luas poer total yang diperlukan lebih kecil dari pada setengah luas bangunan, maka kita gunakan pondasi setempat dengan poer di atas kelompok tiang pancang. Sardjono (1988) mengatakan bahwa bila luas poer total diperlukan lebih besar daripada setengah luas bangunan, maka biasanya kita pilih pondasi penuh (*raft fondation*) di atas tiang- tiang pancang.

3.9 Penurunan

Penambahan beban di atas suatu permukaan tanah dapat menyebabkan lapisan tanah di bawahnya mengalami pemampatan. Pemampatan tersebut disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari dalam pori, dan sebab-sebab lain. Beberapa atau semua faktor tersebut mempunyai hubungan dengan keadaan tanah yang bersangkutan (Das, Braja M. 1985). Secara umum, Das, Braja M (1985) menjelaskan bahwa penurunan pada tanah yang disebabkan oleh pembebanan dapat dibagi ke dalam tiga kelompok besar sebagai berikut.

1. Penurunan Elastis (*elastic settlement*), yang merupakan hasil dari perubahan volume tanah jenuh air sebagai akibat dari keluarnya air yang menempati pori-pori tanah.
2. Penurunan Konsolidasi Utama (*immediately settlement*), yang merupakan akibat dari deformasi elastis tanah kering, basah, dan jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air. Perhitungan penurunan segera umumnya didasarkan pada penurunan yang diturunkan dari teori elastisitas.
3. Penurunan Konsolidasi Sekunder, yang mana terjadi akibat penyesuaian plastis pada struktur tanah dan berlangsung pada beban efektif yang konstan, dan biasanya terjadi pada tanah kohesif yang tersaturasi.

Dimana jumlah penurunan yang terjadi pada tanah adalah penjumlahan dari penurunan elastis, penurunan konsolidasi utama, dan penurunan konsolidasi sekunder. Teori umum yang mencakup konsep tekanan pori dan tegangan efektif adalah dikembangkan oleh Terzaghi selama tahun 1920-1924. Teori konsolidasi Terzaghi membuat asumsi-asumsi sebagai berikut.

1. Tanah adalah, dan tetap akan, jenuh ($S=100\%$). Penurunan konsolidasi dapat diperoleh untuk tanah yang tidak jenuh, tetapi ramalan waktu terjadinya penurunan sangat tidak dapat dipercaya.
2. Air dan butiran-butiran tanah tidak dapat ditekan.
3. Koefisien permeabilitas k merupakan konstanta. Perubahan temperatur dari sekitar 10 sampai 20⁰C menghasilkan sekitar 30 persen perubahan dalam viskositas air.
4. Konsolidasi merupakan konsolidasi satu dimensi (*vertical*), sehingga tidak terdapat aliran air atau pergerakan tanah lateral.

3.9.1 Penurunan Elastis

Penurunan elastis terjadi langsung ketika pondasi menerima beban dari struktur di atasnya tanpa mengakibatkan perubahan volume yang ada pada tanah. Besaran perubahan volume yang dikarenakan kontak beban struktur dengan pondasi tersebut salah satunya bergantung pada propertis pondasi baik itu pondasi

fleksibel maupun pondasi kaku dimana untuk menghitung jumlah penurunan elastis yang terjadi pada pondasi dipakai Persamaan 3.14 sampai 3.25 sebagai berikut.

$$Se = \Delta \partial \cdot (aB') \cdot \left(\frac{1-\mu^2}{E_s} \right) \cdot I_s \cdot I_f \quad (3.14)$$

Dimana :

$\Delta \partial$ = distribusi beban yang diterima oleh pondasi (kN/m²)

μ_s = rasio Poisson's Tanah

E_s = Modulus Elastisitas

B' = B/2, apabila penurunan yang ditinjau pada pondasi interior

B, apabila penurunan yang ditinjau pada pondasi eksterior maka sebagai berikut.

I_s = faktor bentuk (Steinbrenner, 1934)

$$= F1 + \left(\frac{1-2\mu}{1-\mu} \right) \cdot I_s \cdot I_f \quad (3.15)$$

$$F1 = \left(\frac{1-2\mu}{1-\mu} \right) \cdot (A0 + A1) \quad (3.16)$$

$$F2 = \left(\frac{n'}{2-\eta'} \right) \cdot \tan^{-1} \cdot A2 \quad (3.17)$$

$$A0 = m' \cdot \ln \left(\frac{1 + \sqrt{m^2+1} \times \sqrt{m^2+n^2}}{m'(1+\sqrt{m^2+n^2+1})} \right) \quad (3.18)$$

$$A1 = \ln \left(\frac{m' + \sqrt{m^2+1} \times \sqrt{1+n^2}}{m' \sqrt{m^2+n^2+1}} \right) \quad (3.19)$$

$$A2 = \frac{m'}{n' \sqrt{m^2+n^2+1}} \quad (3.20)$$

I_f = faktor kedalaman (Fox, 1948) (3.21)

$$= \frac{Df}{B}$$

a = factor yang mana bergantung pada lokasi dimana pondasi ditinjau

Dimana, bila yang ditinjau adalah penurunan pada bagian tengah pondasi

maka,

$$a = 4$$

$$m' = \frac{L}{B} \quad (3.22)$$

$$n' = \frac{H}{\left(\frac{B}{2}\right)} \quad (3.23)$$

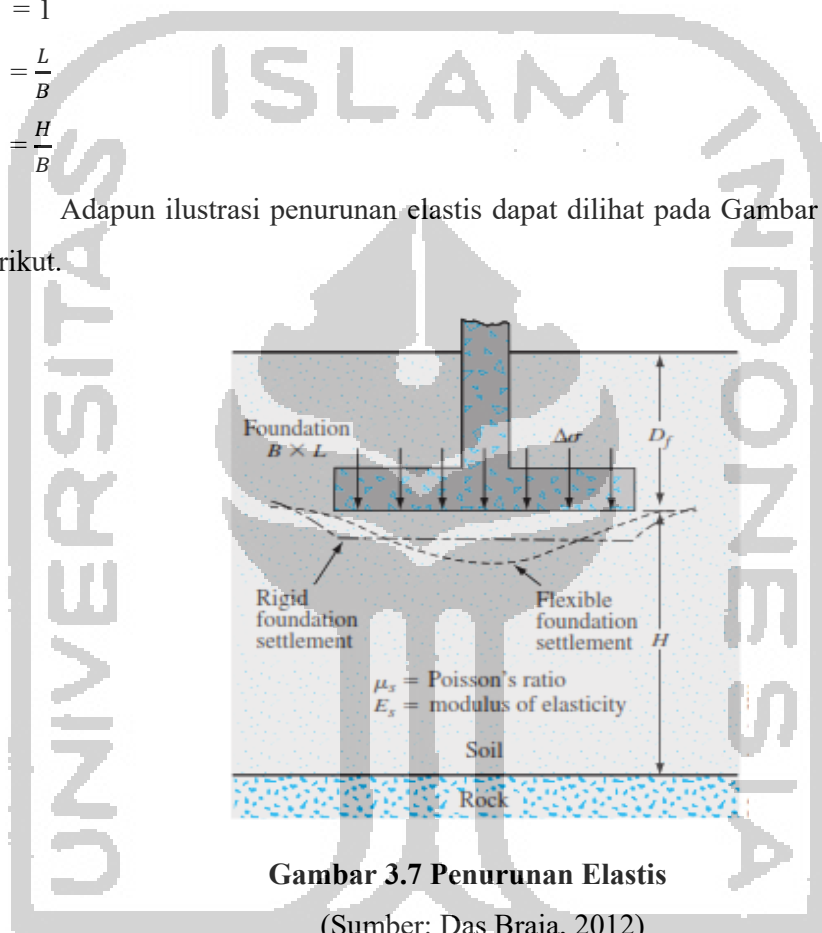
Apabila ditinjau penurunan pada bagian ujung tiang pondasi maka sebagai berikut.

$$a = 1$$

$$m' = \frac{L}{B} \quad (3.24)$$

$$n' = \frac{H}{B} \quad (3.25)$$

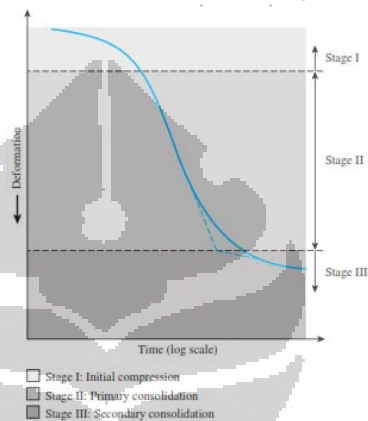
Adapun ilustrasi penurunan elastis dapat dilihat pada Gambar 3.7 sebagai berikut.



3.9.2 Penurunan Konsolidasi Utama

Konsolidasi adalah proses berkurangnya volume atau berkurangnya rongga pori dari tanah jenuh berpermeabilitas rendah akibat pembebanan. ketika tekanan pada sebuah lapisan tanah yang tersaturasi bertambah, tekanan air pori tanah pun secara mendadak ikut bertambah. pada tanah berpasir yang mana memiliki permeabilitas tinggi kejadian ini berlangsung cepat, karenanya pada tanah berpasir penurunan elastis dan penurunan akibat konsolidasi utama berlangsung bersamaan.

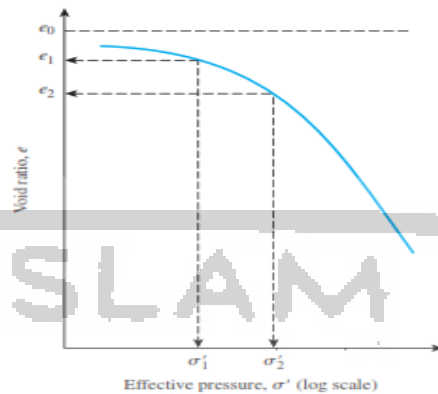
Sedangkan pada tanah lempung, karena memiliki permeabilitas rendah maka proses penurunan elastis dan penurunan akibat konsolidasi utama, selesainya tidak akan bersamaan, penurunan pada tanah lempung yang diakibatkan oleh konsolidasi utama juga kemungkinan besar akan lebih besar ketimbang dengan penurunan elastisnya.. Dimana untuk grafik hubungan waktu dan penurunan bisa dilihat pada gambar 3.8 sebagai berikut.



Gambar 3.8 Grafik Hubungan Penurunan dan Waktu

(Sumber : Das Braja, 2008)

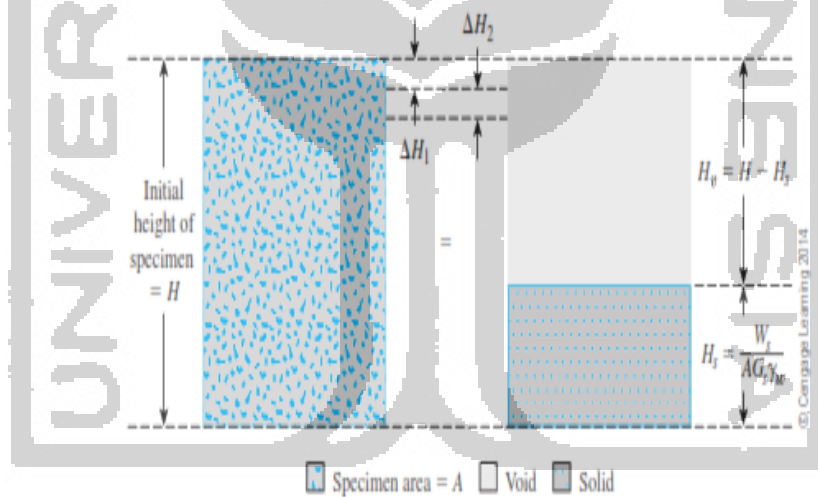
Adapun pada Kedudukan 1 (*stage 1*) kompresi awal akibat beban awal terhadap benda uji, setelah itu pada Kedudukan 2 (*stage 2*) bagian garis lurus, menunjukkan proses konsolidasi awal. dan terakhir pada Kedudukan 3 (*stage 3*) menunjukkan proses konsolidasi sekunder. Untuk penambahan beban, tegangan yang terjadi tegangan efektif jika nilai G_s dimensi awal serta penurunan dicatat. maka angka pori diperoleh, selanjutnya tegangan efektif dan angka pori (e) diplot digrafik semi logaritmis. Tipikal grafik hubungan e dengan $\log p$ bisa dilihat pada Gambar 3.9 berikut.



Gambar 3.9 Tipikal Grafik Hubungan e dengan $\log p'$

(Sumber : Braja Das, 2008)

Adapun untuk memahami lebih dalam terkait uji konsolidasi terutama pada perubahan ketinggian specimen tanahnya, bisa dilihat pada Gambar 3.10 berikut.



Gambar 3.10 Perubahan Ketinggian pada test konsolidasi satu dimensi

(Sumber : Braja Das, 2008)

Dimana untuk perhitungannya penurunan primer dihitung menggunakan Persamaan 3.26 sebagai berikut.

$$S_c = \frac{C_s H}{1+e_0} \log \frac{\partial r_c}{\partial r_0} + \frac{C_c H}{1+e_0} \log \left(\frac{\partial' o + \Delta \partial r'}{\partial r_c} \right) \quad (3.26)$$

Dimana :

$\Delta\delta$ = Pergantian Tekanan *Overburden* (kN/m^2)

e_0 = Rasio Void Awal

C_c = Indeks Kompresi

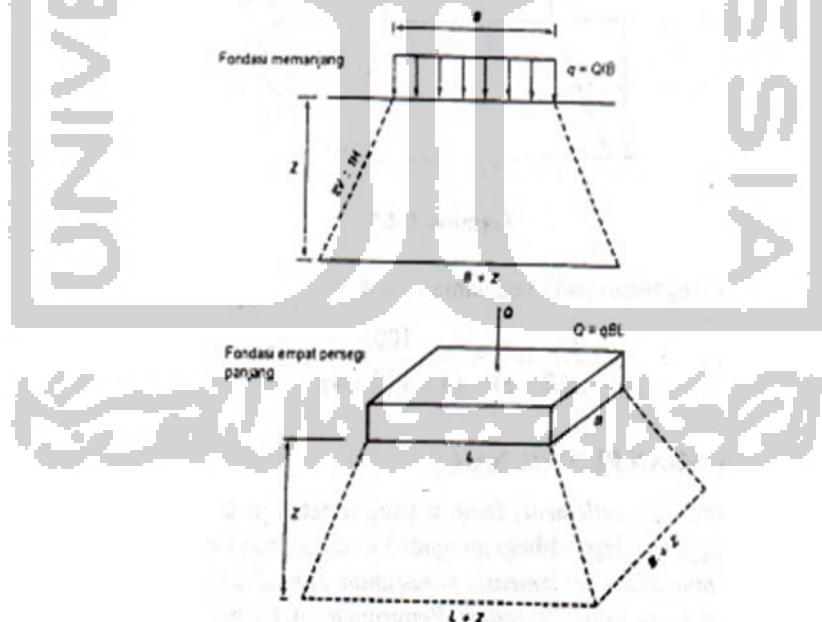
C_s = Indeks Kembang (*Swell*)

δ = Tekanan *Overburden* (kN/m^2)

H = tebal (cm)

1. Metode Canonica dan Wesley

Perhitungan *settlement* pondasi tiang yang dikembangkan oleh Canonica (1991) dan Wesley (2012), didasarkan atas *teori Boussinesq*. Metode ini merupakan salah satu cara pendekatan yang sangat sederhana untuk menghitung penyebaran tegangan akibat pembebanan. Caranya dengan membuat garis penyebaran beban 2V : 1H. Dalam cara ini, beban pondasi Q dianggap didukung piramid yang mempunyai kemiringan sisi 2V : 1H (Hary, 2002) dimana lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.11 sebagai berikut.

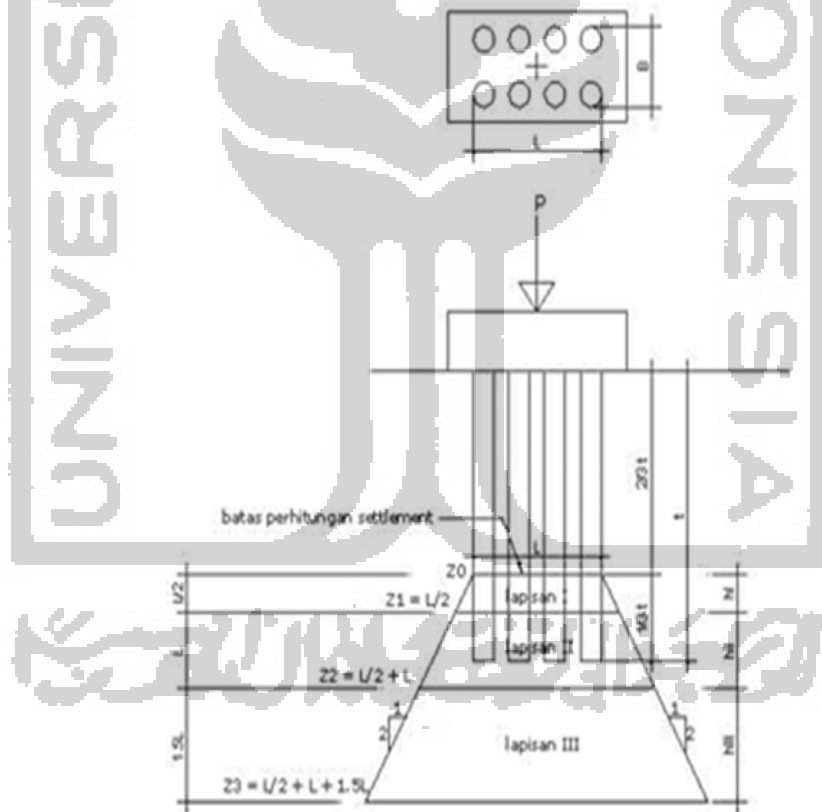


Gambar 3.11 Penyebaran Tegangan Boussinesq

Teori Boussinesq ini kemudian dikembangkan oleh Canonica (1991) dan Wesley (2012) untuk menghitung penurunan pondasi kelompok tiang sebagai berikut.

a. *End Bearing Pile*

Pada perhitungan *settlement* kelompok tiang dengan tahanan ujung (*end bearing pile*) tegangan pada tanah akibat berat bangunan dapat diperhitungkan merata pada kedalaman $2/3 t$ (panjang tiang) dan disebarakan dengan sudut penyebaran $2V : 1H$. Pembagian lapisan tanah dibawah garis batas Z_0 sampai dengan Z_3 didasarkan nilai tegangan pondasinya kurang dari 20% atau lebih. Dimana lebih jelasnya bisa dilihat pada Gambar 3.12 sebagai berikut.



Gambar 3.12 Skema Penurunan *End Bearing Pile*

1) Tegangan Aktif ($\Delta\sigma$)

Adapun untuk menghitung tegangan aktif yang terjadi pada tiang pancang digunakan Persamaan 3.27 sebagai berikut.

$$\Delta\sigma_{z_0} = \frac{P}{(B + Z_0)(L + Z_0)} \quad (3.27)$$

Dimana :

P = Beban Poin Desain (Kg)

B = Lebar (cm)

Z = Kedalaman (cm)

L = Tinggi (cm)

2) Rata-Rata Tegangan Aktif Perlapis ($\overline{\Delta\sigma Z}$)

Setelah mendapatkan tegangan aktif dihitung per lapisnya dengan Persamaan 3.28 sebagai berikut

$$\overline{\Delta\sigma_{Z1}} = (\Delta\sigma_{z_0} + \Delta\sigma_{z_1})/2 \quad (3.28)$$

3) Modulus Young (E)

Untuk mendapatkan nilai modulus young digunakan pendekatan korelasi modulus young dengan nilai sondir pada lapisan tanah tersebut yang mana bisa dilihat pada Tabel 3.6 sebagai berikut.

Tabel 3.6 Korelasi Nilai CPT dan Modulus Young

Soil Type	Correlation	Remarks
Clay and Silt	$E_s = 21 q_c^{1.09}$	Various Pile Types
	$E_s = 15 q_c$	
Silty Sand	$E_s = a \cdot q_c$	a = 20-40
	$E_s = 53 q_c^{0.61}$	Eb & qc in MN/m ²
Unspecified	$E_s = a \cdot q_c$	a = 24-30 dynamic modulus value
	$E_s = 10.8 + 66 q_c$	Eb & qc in MN/m ² (for qc > 0.4 MN/m ²)

Sumber : Poulos (1992)

4) Penurunan (Δh)

Untuk penurunan per lapis nya dihitung menggunakan Persamaan 3.29 sebagai berikut.

$$\Delta h_1 = ((\Delta \sigma_{z1} / E1) \times h_1) \quad (3.29)$$

lalu penurunan per lapisnya ditotal kemudian hasil tersebut dijadikan acuan penurunan maksimum yang terjadi pada pondasi tiang.

5) Konversi Penurunan Kelompok menjadi Penurunan Tiang

Konversi penurunan kelompok menjadi penurunan tiang menggunakan metode rasio penurunan dimana Persamaan pada 3.30 sebagai berikut.

$$S_g = R_s \cdot S_1 \quad (3.30)$$

Dimana :

S_g = Penurunan kelompok tiang

R_s = Rasio penurunan

S_1 = penurunan tiang tunggal

Sedangkan :

$$R_s = n^{\omega}$$

Dimana :

n = jumlah tiang

ω = eksponen, umumnya antara 0,2 – 0,6

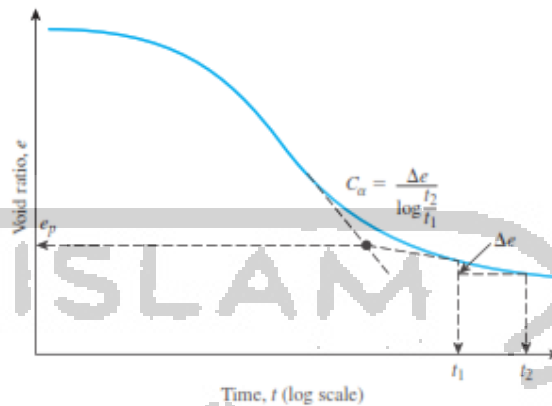
Poulos (1989), menyarankan angka ω untuk tujuan praktis yaitu :

a) pondasi tiang di lempung : $\omega = 1/2$

b) pondasi tiang di pasir : $\omega = 1/3$

3.9.3 Penurunan Konsolidasi Sekunder

Pada akhir konsolidasi primer (setelah tegangan air pori $U = 0$), penurunan pada tanah masih tetap terjadi sebagai akibat dari penyesuaian plastis butiran tanah. Tahapan konsolidasi ini dinamakan konsolidasi sekunder. Variasi angka pori dan waktu untuk penambahan beban akan sama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.13 berikut ini.



Gambar 3.13 Variasi angka pori dan waktu terhadap penambahan beban

(Sumber : Das Braja, 2008)

Adapun besarnya indeks kompresi konsolidasi sekunder dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.31 sebagai berikut.

$$C_a = \left(\frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} \right) = \frac{\Delta e}{\log (t_2 - t_1)} \quad (3.31)$$

Dimana :

C_a = Indeks Kompresi Sekunder

Δe = perubahan rasio pori

t = waktu (s)

Sedangkan untuk penurunan akibat konsolidasi sekunder dapat dihitung dengan Persamaan 3.32 dan 3.33 sebagai berikut.

$$S_s = C'_a \cdot H \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (3.32)$$

dan,

$$C'_a = \frac{C_a}{1 + e_p} \quad (3.33)$$

Dimana :

e_p = rasio pori pada akhir konsolidasi utama

H = tebal lapisan lempung (m)