

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II. 1. Pondasi Dalam

Pondasi dalam dipergunakan pada keadaan tanah di mana suatu bangunan akan dibangun merupakan tanah yang lemah untuk menyediakan daya dukung yang cukup kuat, sehingga beban perlu diteruskan ke lapisan yang lebih kuat.

Jenis pondasi dalam yang paling umum digunakan adalah pondasi tiang dan sumuran. Pondasi tiang dan sumuran digunakan untuk meneruskan beban permukaan pada lapisan pendukung beban yang dalam apabila tanah permukaan tidak mampu mendukung beban yang bekerja. Mekanisme penerusan dukungan pada dasarnya sama bagi kedua sistem itu, perbedaan utama antara pondasi tiang dan pondasi sumuran adalah dalam metode pemasangannya. Tiang-tiang dipasangkan dengan memancang tiang atau selongsong tiang kedalam tanah dengan palu pancang tiang tumbuk atau getar. Sumuran dipasang dengan pemboran atau penggalian lubang silinderis sampai kedalaman yang diinginkan dan kemudian mengisi kembali lubang dengan beton. Karena tiang pancang dan sumuran memperoleh dukungan yang pada dasarnya dengan cara sama maka pembahasan selanjutnya dicurahkan pada pondasi tiang.

Tiang-tiang pada umumnya memperoleh dukungan berupa kombinasi dari gesekan sepanjang permukaan badan tiang (*Friction*) dan dukungan ujung tiang (*Point bearing pile*). Dukungan ujung tiang akan terjadi apabila ujung tiang menyentuh tanah keras, yang mampu memikul beban yang diterima oleh tiang pancang tersebut. Lapisan tanah keras ini bisa berupa lempung keras sampai batuan. Perhitungan kemampuan tiang dilakukan terhadap kekuatan bahan tiang dan kekuatan tanahnya. Pada tiang gesekan, daya dukung diperoleh dari pelekatan antara tiang dengan tanah, sehingga dalam perhitungan daya dukungnya harus diketahui besarnya gaya pelekatan tiang dengan tanah..

Pada keadaan sebenarnya sangat jarang dijumpai tiang pancang yang berdiri sendiri, tetapi akan terdiri dari beberapa tiang atau kelompok tiang. Beban-beban yang bekerja biasanya diteruskan ke tiang-tiang melalui *poer* beton bertulang. Satu kelompok tiang biasanya tertanam pada sebuah *poer* dan kelompok ini mendukung beban yang bekerja. Dalam perhitungan-perhitungan *poer* dianggap kaku sempurna sehingga bila beban-beban yang bekerja pada kelompok tiang tersebut menimbulkan penurunan, maka setelah penurunan bidang *poer* akan merupakan bidang yang rata dan gaya-gaya yang bekerja pada tiang berbanding lurus dengan penurunan tiang-tiang tersebut.

Pemancangan tiang pancang di dalam tanah dapat dilakukan dengan sejumlah metoda yaitu :

1. Pemancangan tiang pancang dengan pukulan berturutan secara tetap pada puncak tiang dengan menggunakan martil tiang pancang. Cara ini menimbulkan suara yang berisik dan getaran yang mungkin tidak diperbolehkan oleh

peraturan setempat.

2. Pemancangan yang menggunakan alat penggetar yang ditempelkan (diikatkan) di puncak tiang pancang, metode ini dipakai dalam endapan-endapan yang kohesinya kecil. Cara ini relatif sedikit mengeluarkan suara berisik dan getaran pemancangan yang tidak berlebihan.
3. Dengan mendongkrak tiang pancang, cara ini dipakai untuk bagian-bagian kaku yang pendek.
4. Dengan membor lubang serta memancang sebuah tiang pancang ke dalamnya, atau yang lebih umum lagi dengan mengisi rongga tersebut dengan beton sehingga menghasilkan sebuah tiang pancang yang dikeraskan.

Pemilihan tipe tiang pancang untuk berbagai jenis keadaan tergantung pada banyak variabel. Walaupun demikian harus terdapat indikator yang jelas sehingga dapat menunjukkan kesesuaian beberapa tipe tiang pancang dengan kondisi-kondisi tertentu.

Faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan dalam memilih tiang pancang adalah:

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.

(Sardjono, 1991)

Pada umumnya pondasi tiang pancang terdiri dari berbagai variasi ukuran, bentuk dan bahan memenuhi persyaratan-persyaratan khusus termasuk persyaratan ekonomis. Menurut bahan yang digunakan, tiang pancang terbagi atas empat jenis

yaitu tiang pancang kayu, tiang pancang beton, tiang pancang baja dan tiang pancang komposit. Sesuai dengan uraian pada bab sebelumnya maka pembahasan lebih ditekankan pada tiang pancang beton yang dalam hal ini adalah tiang pancang beton *cast in place* (cor di tempat).

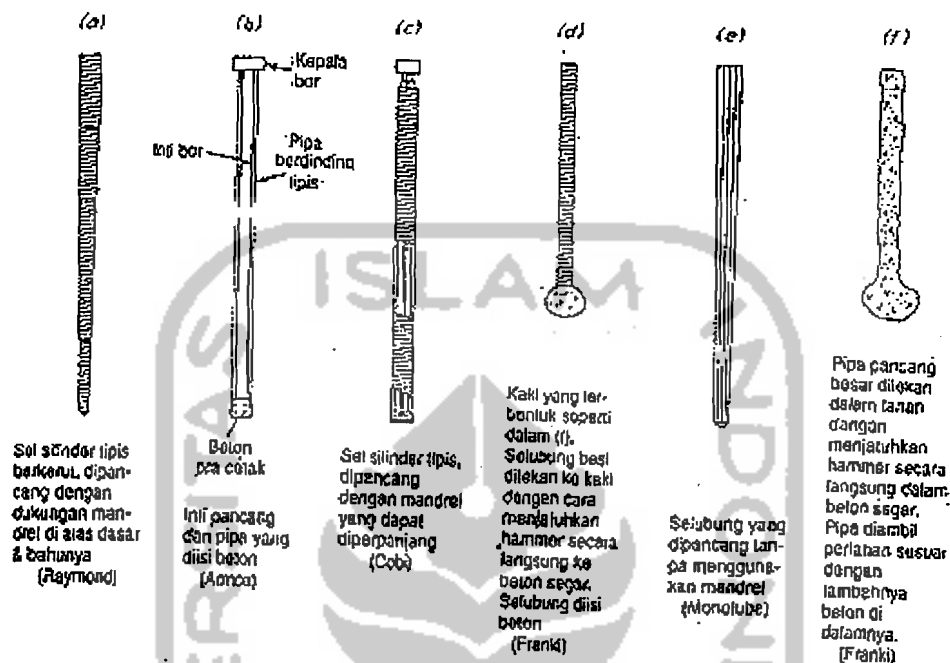
II. 1. 1. Pondasi tiang pancang beton

Tiang pancang beton dapat dibedakan dalam dua jenis yaitu tiang pancang beton cetak di tempat (*Cast in place*) dan tiang pancang beton pracetak (*Precast*). Untuk tiang *precast* dibagi lagi menjadi dua yaitu cetakan (*cased*) dan tanpa cetakan (*uncased*). Pada saat ini pondasi tiang pancang beton yang dicetak di tempat (*Cast in place*) lebih banyak digunakan karena sangat praktis dalam pemancangan, kekuatan tekannya dapat besar dan tidak membutuhkan alat transportasi yang semua itu akan memberikan penyusutan biaya sehingga lebih ekonomis.

Pemasangan tiang pancang *Cast in Place* dapat dilakukan dengan dua cara yaitu :

1. Pipa baja yang dipancangkan ke dalam tanah, kemudian diisi dengan beton dan ditumbuk sambil pipa baja tersebut ditarik ke atas,
2. Pipa baja yang dipancangkan ke dalam tanah kemudian diisi dengan beton, sedangkan pipa baja tersebut tetap tinggal di dalam tanah.

Gambar 2.1 menunjukkan beberapa jenis tiang pancang beton cor di tempat (*Cast in Place*) yang tersedia di pasaran.



Gambar 2.1. Jenis-jenis tiang pancang cor di tempat (*Cast in Place*)

Beton untuk tipe *cased*, dicor pada tempat yang terbuat dari kulit logam tipis atau pipa tipis yang ditinggalkan di dalam tanah. Pipa tersebut sangat tipis sehingga kekuatannya diabaikan pada hitungan kapasitas struktur, tetapi harus mempunyai kekuatan yang cukup sehingga tidak runtuh akibat tekanan tanah yang mengelilinginya sebelum beton dicor. Pondasi tanpa *casing* (cetakan) disebut *uncased*. Beberapa tipe awal dibuat dengan memancang pipa yang mempunyai ujung terbuka ke dalam tanah kemudian membersihkan tanahnya lalu mengisinya dengan beton, sambil menarik pipa keluar. Sebagai contoh adalah pembuatan tiang *Franki* (Gambar 2.1.f). Tiang *Franki* menggunakan sebuah pipa atau tabung yang

dapat ditarik dan ujung bawahnya disumbat dengan beton pra cetak yang sudah kering atau keras. Pipa dipancang dengan *Drop hammer* yang bekerja pada sumbat beton tersebut. Setelah pemancangan pipa mencapai kedalaman yang direncanakan, pipa ditarik keluar dan adukan beton dimasukkan. Proses selanjutnya adukan beton dan sumbat ditumbuk dengan *Drop hammer* sehingga ujung tiang akan melebar dan permukaan tiang menjadi kasar dengan demikian tahanan geser dan kekuatan tiang menjadi besar.

II.2. Pondasi pada Tanah Lunak

Tanah selalu mempunyai peranan penting pada suatu pekerjaan pondasi. Perilaku setiap pondasi sangat tergantung pada karakteristik tanah di bawahnya. Pengetahuan akan jenis dan sifat tanah sangat penting dalam perencanaan struktur bangunan, khususnya struktur bawah atau pondasi. Dalam perencanaan atau pelaksanaan bangunan, para Teknisi Sipil harus mempunyai pengertian yang mendalam mengenai fungsi-fungsi serta sifat-sifat tanah itu bila dilakukan pembebanan di atasnya.

Tanah adalah suatu agregat alam dari butiran mineral dengan atau tanpa bahan organik yang dapat dipisahkan dengan cara mekanis ringan, misalnya dengan pengadukan air (*Peck, Hanson, Thornburn, 1996*). Istilah-istilah utama yang dipakai untuk menyatakan tanah adalah kerikil, pasir, lanau dan lempung. Sebagian tanah alam terdiri dari campuran dua atau lebih dari bahan-bahan tersebut. Bahan-bahan ini mengandung campuran material organik pada keadaan sebagian atau sepenuhnya telah lapuk. Kerikil dan pasir dikenal sebagai tanah berbutir kasar,

sedangkan lanau dan lempung sebagai tanah berbutir halus. Perbedaan ini didasarkan atas apakah partikel-partikel individunya dapat dilihat dengan mata telanjang atau tidak.

Jenis dan kondisi tanah merupakan salah satu faktor yang menentukan dalam pemilihan tipe pondasi untuk suatu struktur bangunan. Idealnya, tanah di mana suatu bangunan akan didirikan memiliki sifat-sifat berikut ini.

1. Mempunyai kekuatan geser yang memadai dan daya dukung yang besar,
2. Bila dibebani akan mengalami deformasi dan penurunan yang kecil,
3. Perubahan volume yang kecil akibat *swelling* (mengembang), penyusutan ataupun karena pembebanan dinamik,
4. Memiliki sifat-sifat yang diinginkan sesuai dengan struktur bangunan yang akan dibangun.

(John N.Cernica, 1995)

Tidak semua tanah di suatu lokasi bangunan memiliki sifat-sifat yang diinginkan, sehingga bila suatu struktur bangunan didirikan di atasnya akan menimbulkan banyak problem, untuk itu dalam perencanaan selanjutnya perlu mempertimbangkan hal-hal sebagai berikut ini.

1. Memilih tipe pondasi yang sesuai dengan kondisi tanah, misal bila tanah berupa tanah yang lunak dan kompresibel maka akan lebih tepat digunakan pondasi tiang pancang atau sumuran.
2. Memperbaiki kondisi tanah, misalnya dengan memperbesar kekuatan tanah dengan pemadatan.

Salah satu jenis tanah yang memerlukan penanganan yang serius jika akan mendirikan struktur bangunan di atasnya adalah tanah lunak (*Soft soil*). Umumnya lapisan tanah yang disebut tanah lunak adalah lempung (*clay*) atau lanau (*silt*) yang mempunyai harga pengujian Penetrasi Standar (SPT) N yang lebih kecil dari 4 atau tanah organis seperti tanah gambut yang mempunyai kadar air alamiah sangat tinggi. Biasanya sebagian besar lapisan lunak telah dibentuk oleh proses alamiah. Tebal, luas dan stratifikasinya sangat tergantung dari corak topografi dan geologi yang membentuk lapisan lunak tersebut serta kondisi sekeliling sesudah terjadinya formasi tanah itu. Bilamana diperlukan untuk membangun di atas lapisan tanah lunak tersebut, maka pertama-tama masalah teknis yang harus diselidiki adalah daya dukung (*Bearing capacity*) dan penurunan (*Settlement*). Sifat lapisan tanah lunak adalah gaya gesernya yang kecil, kemampatan besar dan koefisien permeabilitas yang kecil. Jadi bila pembebanan konstruksi melampaui daya dukung yang diijinkan, maka akan terjadi kerusakan tanah pondasi. Meskipun intensitas beban itu kurang dari daya dukung diijinkan, dalam jangka waktu lama besarnya penurunan akan meningkat yang akhirnya akan mengakibatkan berbagai kesulitan.

Lapisan tanah lunak umumnya terdiri dari tanah yang sebagian besar terdiri dari butir-butir halus yang sangat kecil seperti lempung atau lanau. Lempung terdiri dari butir-butir yang sangat kecil dan menunjukkan plastisitas serta kohesi. Kohesi menunjukkan bahwa bagian-bagian dari lempung melekat satu sama lain. Plastisitas adalah sifat yang memungkinkan bentuk dari suatu bahan berubah-ubah tanpa menimbulkan perubahan isi atau tanpa kembali ke bentuk aslinya dan tidak terjadi retakan-retakan atau pecah.

Lanau adalah bahan yang merupakan peralihan antara lempung dan pasir halus. Lanau bersifat kurang plastis dan lebih mudah ditembus air serta memiliki sifat-sifat dilatasi. Dilatasi ini menunjukkan gejala perubahan isi apabila lanau itu diubah bentuknya dan menunjukkan gejala untuk menjadi hidup (*quick*) bila digetarkan. Lanau merupakan partikel batuan yang ukuran butirannya lebih besar dari fraksi mikroskopis (\varnothing 0,002 mm). Plastisitas lanau berasal dari prosentase tinggi zat organik. Tebal lapisan lanau dan jumlah zat organiknya dipengaruhi oleh keberadaannya, misalnya terbentuk di daerah pantai atau lapisan karang. Bila tanah terletak di bawah permukaan air tanah dan tidak pernah kering, maka tanah akan lunak dan kompresibel seperti lempung. Oleh karena itu lanau mempunyai sifat yang hampir serupa dengan lempung. Dengan pertimbangan ini, perencanaan pondasi pada tanah lanau dianggap sama dengan perencanaan pondasi pada tanah lempung.

II.2.1. Sifat endapan lempung yang berhubungan dengan perencanaan pondasi

Lempung terutama merupakan agregat kristalin berukuran mikroskopis dan submikroskopis. Lempung ciri khas dari sifat-sifat kolodial yaitu plastisitas, kohesi dan kemampuan mengadsorpsi ion. *J.E.Bowles, 1991* mendefinisikan tanah kohesif sebagai kumpulan dari partikel-partikel mineral yang mempunyai indeks plastisitas, dimana pada waktu mengering membentuk suatu massa yang bersatu sehingga diperlukan suatu gaya untuk memisahkan butiran mikroskopis.

Tanah-tanah kohesif umumnya mempunyai sifat-sifat sebagai berikut :

1. Kuat geser rendah,
2. Bila basah bersifat plastis dan mudah pampat,

3. Menyusut bila kering dan mengembang bila basah,
4. Berkurang kuat gesernya bila kadar air bertambah,
5. Berkurang kuat gesernya bila struktur tanahnya terganggu,
6. Berubah volumenya dengan bertambahnya waktu akibat rangkakan (*creep*) pada beban yang konstan,
7. Merupakan material kedap air,
8. Material yang jelek untuk tanah urug karena akan menghasilkan tekanan lateral yang tinggi.

Untuk pekerjaan-pekerjaan tertentu, sifat-sifat tanah kohesif yang perlu ditentukan adalah kadar air, berat volume dan angka pori, kuat geser, plastisitas, sensitivitas, kompresibilitas serta sifat kembang susut.

A. Kuat geser tanah

Pengetahuan kekuatan geser tanah diperlukan untuk berbagai macam soal praktis, terutama untuk menghitung daya dukung tanah (*bearing capacity*) dan tegangan tanah. Untuk analisis stabilitas pondasi pada tinjauan jangka pendek, kuat geser tanah lempung diperoleh dari pengujian triaksial, pengujian tekan bebas di laboratorium dan pengujian baling-baling di laboratorium atau di lapangan. Untuk pekerjaan pondasi pada tanah lempung jenuh yang tak mengandung retakan atau butiran kasar, umumnya lebih sering dipakai pengujian tekan bebas, kecuali untuk pekerjaan-pekerjaan yang besar maka pengujian kuat geser lain juga dilakukan. Nilai C' dan ϕ' pada tanah lempung diperoleh dari percobaan *Consolidated undrained* (konsolidasi tanpa drainase) dan jika plastisitas tanah lempung agak rendah sehingga mudah dirembesi air maka percobaan *Consolidated drained*

(konsolidasi dengan drainase) juga dapat dilakukan. Nilai C' dan ϕ' pada tanah lempung diperoleh dari percobaan *consolidated undrained* (konsolidasi dengan drainase) dan jika plastisitas tanah lempung agak rendah sehingga mudah dirembesi air maka percobaan *consolidated drained* juga dapat dilakukan.

Pada pengujian tekan bebas, kuat geser tanah dukungan dianalisis pada kondisi ϕ sama dengan nol. Untuk mendapatkan nilai C' dan ϕ' dari hasil percobaan triaksial, dipakai lingkaran *Mohr*. Lingkaran *Mohr* adalah cara grafik untuk menentukan tegangan-tegangan yang bekerja pada suatu bahan (tanah).

Harga C' dan ϕ' untuk lempung mempunyai variasi yang sangat besar. Secara garis besar, harga C' tergantung pada derajat *overconsolidation* (konsolidasi berlebihan). Lempung yang mengalami *normally consolidated* (konsolidasi normal) mempunyai harga C' yang kecil sekali (hampir mendekati nol). Makin besar *overconsolidation* harga C' akan semakin besar.

B. Plastisitas dan konsistensi

Plastisitas adalah kemampuan butiran untuk tetap melekat antara satu dengan yang lain. Batasan keplastisan tanah tergantung pada sejarah terjadinya dan komposisi mineral yang dikandungnya. Dalam pekerjaan pondasi, tiga nilai kadar yang memberikan indikasi sangat berguna untuk memperkirakan perilaku tanah berbutir halus adalah kadar air (w) di tempat pekerjaan pondasi dan dua batas konsistensi yaitu batas cair (LL) serta batas plastis (PL). Hal ini berhubungan dengan stabilitas tanah.

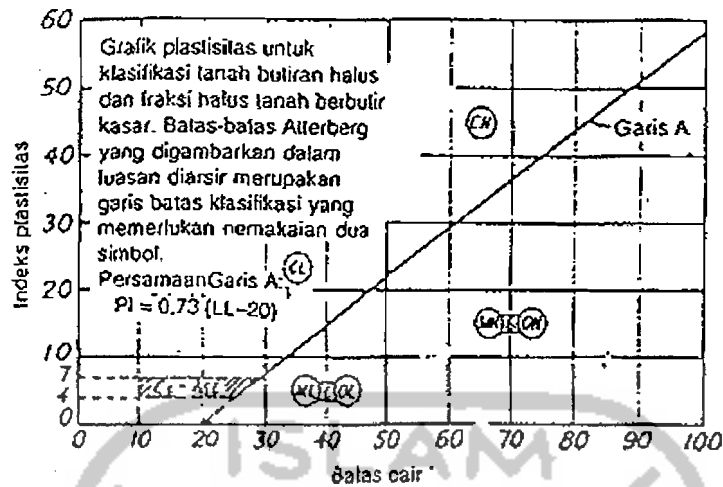
Batas cair (LL) adalah nilai kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan plastis. Pada keadaan ini butiran-butiran tersebar dan dukung oleh air. Jika

kadar air berkurang, misalnya akibat dikeringkan, perubahan volume yang terjadi adalah akibat berkurangnya air. Jadi hilangnya kandungan air sama dengan pengurangan volume. Jika kadar air berkurang terus, butiran-butiran menjadi mendekat satu sama lain sampai mendekati batas plastis (PL), yaitu kadar air tanah pada kedudukan antara plastis dan semi padat.

Penentuan batas-batas plastisitas antara lain berguna untuk membedakan kemungkinan dua jenis tanah yang mempunyai gradasi sama namun mempunyai sifat yang berbeda. Jika nilai PL dan LL bertambah, diperkirakan butiran tanah semakin halus. Selisih antara LL dan PL disebut indeks plastisitas (PI) atau $PI = LL - PL$.

Indeks plastisitas menyatakan interval kadar air dimana tanah tetap dalam kondisi plastis dan juga menyatakan jumlah relatif partikel lempung dalam tanah. Jika PI tinggi maka tanah banyak mengandung lempung. Nilai PI yang rendah menandakan tanah banyak mengandung lanau. Tanah dengan plastisitas tinggi menandakan karakteristik tanah yang tidak baik, karena sering menimbulkan hal-hal yang tidak diinginkan, seperti penurunan pondasi yang berlebihan, gerakan dinding penahan tanah, keruntuhan lereng dan lain-lain.

Interprestasi batas-batas plastis dan batas cair dapat dilakukan dengan bantuan diagram hubungan antara indeks plastisitas dan batas cair (Gambar 2.2). Dalam gambar tersebut ordinat menyatakan nilai indeks plastisitas (PI) dan absis menyatakan batas cair (LL) untuk tanah-tanah yang anorganik.



Gambar 2.2. Grafik hubungan indeks plastisitas dengan batas cair.
 (Cassie, 1968 dan Peck dkk, 1953)

C. Kompresibilitas

Bila tanah berbutir halus yang jenuh air dibebani, tanah akan terkompresi dan karena permeabilitas tanah ini kecil, pengurangan volume tanah memerlukan waktu lama yaitu waktu yang dibutuhkan oleh air pori untuk meninggalkan lapisan tertekan hingga tekanan air porinya dalam keseimbangan dengan tekanan akibat kedudukan air tanahnya. Pengurangan volume tanah akibat pembebanan ini akan mengakibatkan penurunan tanah. Jika beban dikurangi lempung akan mengembang dan permukaan tanah menjadi naik. Dalam beberapa hal, kasus ini dapat mempengaruhi stabilitas pondasi.

Sifat kompresibilitas tanah lempung tergantung dari sejarah geologi tanahnya, apakah tanah tersebut terkonsolidasi normal atau terkonsolidasi berlebihan. Pada beban yang sama tanah terkonsolidasi normal akan mengalami penurunan yang lebih besar daripada tanah yang terkonsolidasi berlebihan.

D. Sensitivitas

Tanah-tanah kohesif sering kehilangan sebagian dari kuat gesernya bila susunan tanahnya terganggu. Kehilangan kuat geser akibat gangguan susunan tanah pada kadar air tetap dinyatakan dalam istilah sensitivitas. Sensitivitas didefinisikan sebagai nilai banding kuat geser tanpa drainase dalam kondisi terganggu terhadap kuat geser tanpa drainase yang sudah berubah susunan tanah aslinya, pada kadar air yang sama.

E. Kembang susut

Beberapa tanah lempung dalam mendukung beban pondasi sangat tergantung pada sejarah geologi, kadar air dan kandungan mineralnya. Tanah lempung dinyatakan sebagai tanah lunak, sedang atau kaku tergantung dari kadar airnya seperti yang dinyatakan dalam konsistensi. Pada waktu kering, tanah ini dapat sangat keras dan menyusut yang disertai dengan retakan. Waktu basah, kuat geser akan turun dan lempung akan menjadi mengembang. Jenis lempung yang kaku sampai keras hanya mengalami penurunan konsolidasi yang kecil di bawah tekanan yang relatif besar. Jika dalam lapisan tanah ini terdapat butiran pasir dan kerikil, perancangan pondasi harus memperhitungkan variasi daya dukung dan penurunan pada lokasi tertentu.

II. 2. 2. Konsolidasi dan penurunan

Tanah akan mengalami deformasi karena beban dan apabila deformasi pada bagian yang tidak sama dari bangunan cukup untuk menyebabkan kerusakan dalam bagian-bagian bangunan. Keadaan ini dapat menimbulkan suatu keruntuhan struktural. Bila suatu lapisan tanah mendapat tambahan beban di atasnya, maka air

pori akan mengalir keluar dari lapisan tanah tersebut sehingga isinya (volume) akan menjadi lebih kecil. Proses ini disebut konsolidasi.

Pada tanah lempung perubahan volume berlangsung lama dan merupakan fungsi dari waktu, hal ini karena permeabilitasnya rendah. Perubahan volume tanah dalam arah vertikal disebut penurunan konsolidasi. Besarnya penurunan konsolidasi pada tanah lempung sangat tergantung pada sejarah geologi lapisannya, yaitu apakah lempung terkonsolidasi normal atau konsolidasi berlebihan. Ada beberapa cara pendekatan untuk membedakan kedua jenis tanah lempung tersebut yaitu :

1. Dengan mengetahui sejarah geologi tanahnya yaitu dengan meneliti apakah tebal lapisan tanah waktu lampau pernah berkurang atau dengan mengetahui apakah kedudukan muka air tanah sekarang lebih tinggi dari waktu yang lampau,
2. Menentukan indeks cair (LI) dari tanah lempung yaitu :

$$LI = \frac{WN - PL}{LL - PL}$$

dimana : LI = indeks cair

WN = kadar air asli di lapangan

PL = batas plastis

LL = batas cair

Lempung terkonsolidasi normal mempunyai indeks cair (LI) antara 0,6 sampai 1 dan lempung terkonsolidasi berlebihan mempunyai indeks cair dari 0 sampai 0,6 nilai-nilai tersebut hanya sebagai petunjuk secara kasar.

A. Hitungan penurunan

Penurunan (*settlement*) pondasi yang terletak pada tanah lunak atau tanah berbutir halus yang jenuh dapat dibagi menjadi tiga komponen, yaitu penurunan segera (*elastic settlement / immediate settlement*), penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*) yang terdiri dari penurunan konsolidasi primer dan konsolidasi sekunder. Penurunan total adalah jumlah dari ketiga komponen penurunan tersebut.

Bila dinyatakan dengan persamaan adalah sebagai berikut :

$$S = S_i + S_c + S_s \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana : S = penurunan total (cm)

S_i = penurunan segera (cm)

S_c = penurunan konsolidasi primer (cm)

S_s = penurunan konsolidasi sekunder (cm)

Penurunan segera (penurunan elastis) adalah penurunan yang dihasilkan oleh massa tanah yang tertekan dan terjadi pada volume konstan. Penurunan pada tanah-tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus yang tak jenuh termasuk tipe penurunan segera karena penurunan terjadi segera sesudah pembebanan.

Penurunan konsolidasi terdiri dari dua tahap yaitu penurunan konsolidasi primer dan penurunan konsolidasi sekunder. Penurunan konsolidasi primer adalah penurunan yang terjadi sebagai akibat dari pengurangan volume tanah karena aliran air meninggalkan zona tertekan yang diikuti oleh pengurangan kelebihan tekanan pori. Penurunan konsolidasi sekunder adalah penurunan yang terjadi

setelah penurunan konsolidasi primer telah selesai yang tegangan efektif akibat beban telah konstan.

Besarnya penurunan tergantung pada karakteristik tanah dan penyebaran tekanan pondasi ke tanah di bawahnya. Penurunan pondasi bangunan dapat diestimasi dari hasil-hasil pengujian laboratorium pada contoh-contoh tanah tak terganggu yang diambil dari pengeboran atau dari persamaan empiris yang dihubungkan dengan hasil pengujian di lapangan secara langsung.

A. 1. Penurunan segera (*Elastic Settlement/Immediate Settlement*)

Perhitungan penurunan segera dapat dicari dengan berbagai persamaan yang sesuai dengan kondisi tanah pendukungnya. Dari beberapa persamaan tersebut, persamaan penurunan dari *Janbu*, *Bjerrum* dan *Kjaernsli*, 1956 lebih banyak digunakan.

Besarnya penurunan segera tersebut adalah :

$$S_i = \frac{\mu_1 \cdot \mu_0 \cdot q_n \cdot B}{E} \quad (2.2)$$

dimana : S_i = penurunan segera (cm)

μ_1 = faktor koreksi untuk lapisan tanah dengan tebal terbatas H

μ_0 = faktor koreksi untuk kedalaman pondasi D_f

B = lebar pondasi (m)

q_n = tekanan pondasi netto (kN)

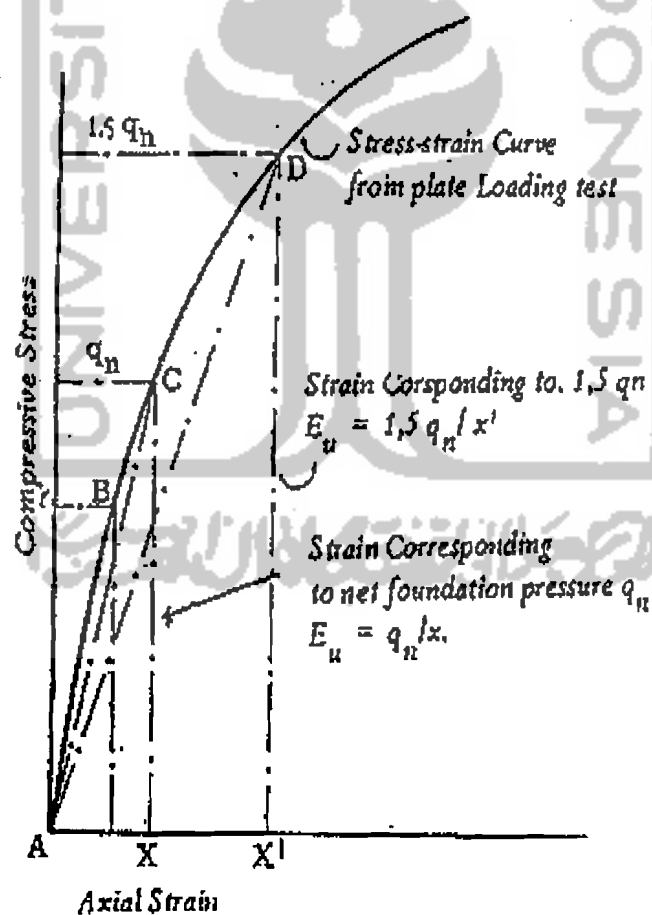
= V/A

A = luas pondasi (m^2)

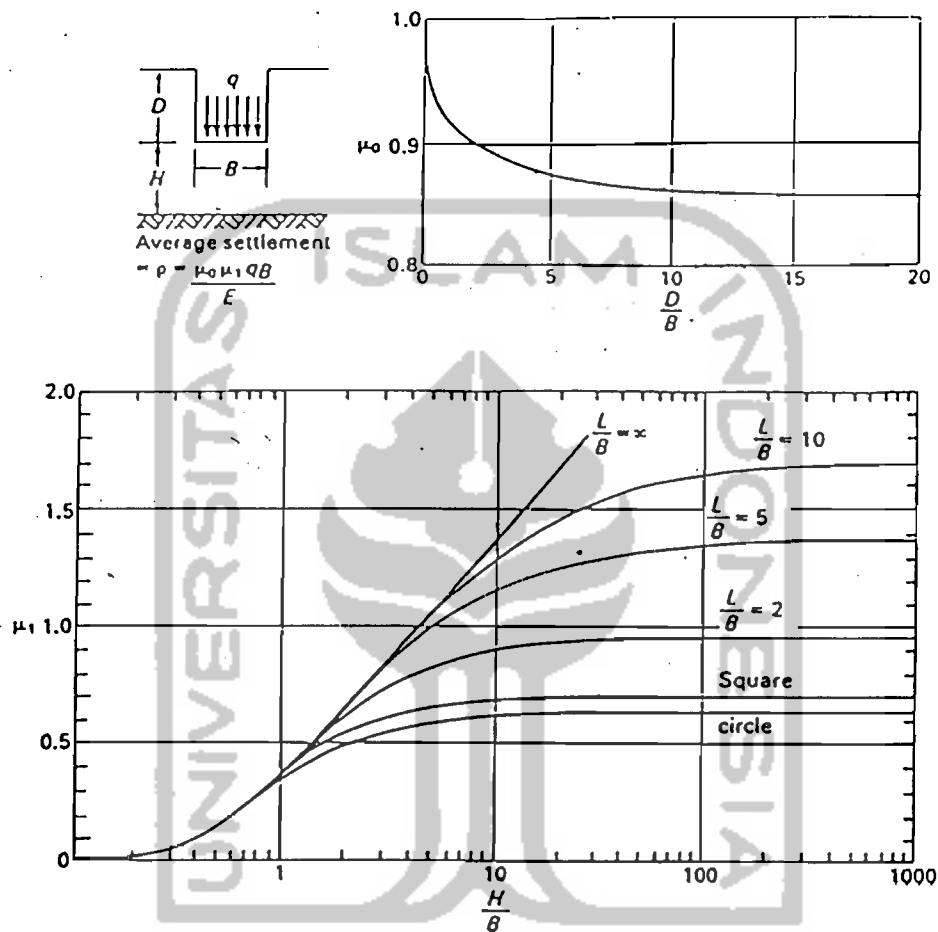
V = beban vertikal + berat sendiri (kN)

E = modulus elastis tanah (kN/m^2)

Diagram pada gambar 2.3 dan 2.4 dapat digunakan untuk memperoleh nilai μ_0 dan μ_1 dengan modulus E yang bervariasi kedalamannya. Hitungan penurunan segera dilakukan dengan membagi tanah kedalam beberapa lapisan yang terbatas. Jika regangan pada tiap lapisan dapat dihitung, akan dapat diperoleh nilai penurunan segera totalnya.



Gambar 2.3 Grafik modulus deformasi E



Gambar 2.4. Grafik faktor reduksi μ_0, μ_1 (Janbu, Bjerrum dan Kjaernsli, 1956)

A. 2. Penurunan konsolidasi primer

Interval tekanan yang diperhatikan dalam analisis penurunan konsolidasi umumnya diantara tekanan vertikal efektif sebelum pembebanan (P_0') yaitu tekanan efektif awal dan tekanan vertikal akibat beban tanah ditambah tekanan akibat penyebaran beban pondasi pada kedalaman yang ditinjau (Δp). Jadi untuk hitungan penurunan angka pori e_0 diambil pada kedudukan P_0' , sampai angka pori

menjadi e_1 yaitu angka pori saat berakhirnya konsolidasi. Pada saat konsolidasi berakhir tekanan vertikal pada kedalaman tanah yang ditinjau terletak pada kedudukan $P_1' = P_0' + \Delta p$.

Titik e_0 diambil dari kurva $e - p$ dan dipilih titik pada kurva dengan tekanan P_0' . Tekanan P_0' ini adalah tekanan awal pada kedalaman contoh tanah yang diuji. Bila contoh tanah yang jenuh tidak mengalami gangguan, maka $e_0 = w \cdot G_s$, dengan w adalah kadar air asli di lapangan dan G_s adalah berat jenis tanahnya. Titik e_1 dipilih titik pada kurva yang telah terkoreksi akibat gangguan contoh tanah pada tekanan P_1' .

Penurunan konsolidasi dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$S_c = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H = \frac{e_1 - e_0}{1 + e_0} H \quad (2.3)$$

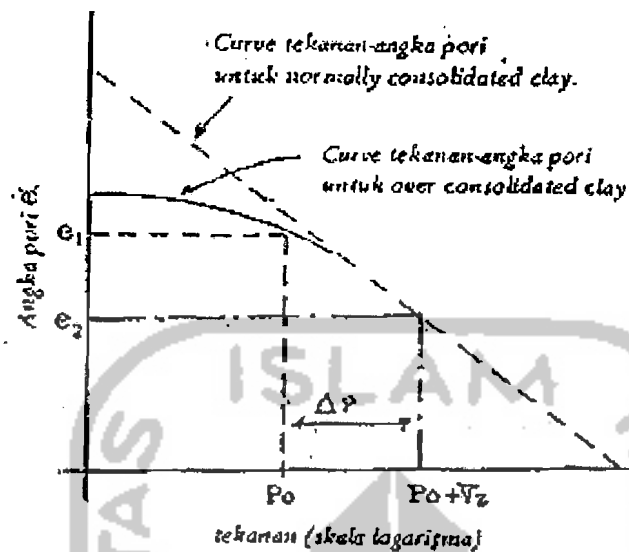
dimana : S_c = penurunan konsolidasi primer (cm)

Δe – perubahan angka pori akibat pembebanan

e_0 = angka pori awal

e_1 = angka pori saat berakhirnya konsolidasi

H = tebal lapisan yang ditinjau (m)



Gambar 2.5 Grafik hubungan tekanan dengan angka pori (M. J. Tomlinson, 1977)

Langkah-langkah hitungan penurunan konsolidasi dilakukan sebagai berikut :

1. Lapisan tanah yang terkonsolidasi dibagi menjadi n lapisan,
2. Hitungan besar tegangan efektif P_o' pada tiap-tiap tengah lapisan,
3. Hitung tambahan tegangan pada tiap tengah lapisan Δp akibat beban yang bekerja,
4. Hitung Δe untuk tiap-tiap lapisan,
5. Hitung penurunan konsolidasi total pada seluruh lapisan dengan menggunakan persamaan

$$S_c = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta S_c = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta e_i}{1 + e_0} \Delta H_i \quad \dots \dots \dots (2.4)$$

A. 3. Penurunan konsolidasi sekunder

Penurunan konsolidasi sekunder terjadi pada tegangan efektif yang konstan yaitu setelah penurunan konsolidasi primer berhenti. Besarnya penurunan merupakan fungsi dari waktu (t) dan kemiringan kurva indeks pemampatan ($C\alpha$).

Persamaan kemiringan $C\alpha$ dinyatakan sebagai berikut :

$$C\alpha = \frac{\Delta e}{\log(t_2/t_1)} \quad (2.5)$$

Penurunan konsolidasi sekunder dihitung dengan persamaan :

$$S_s = \frac{C\alpha}{1 + e_p} H \log \frac{t_2}{t_1} \quad (2.6)$$

dimana : S_s = penurunan konsolidasi sekunder (cm)

H = tebal lapisan lempung (m)

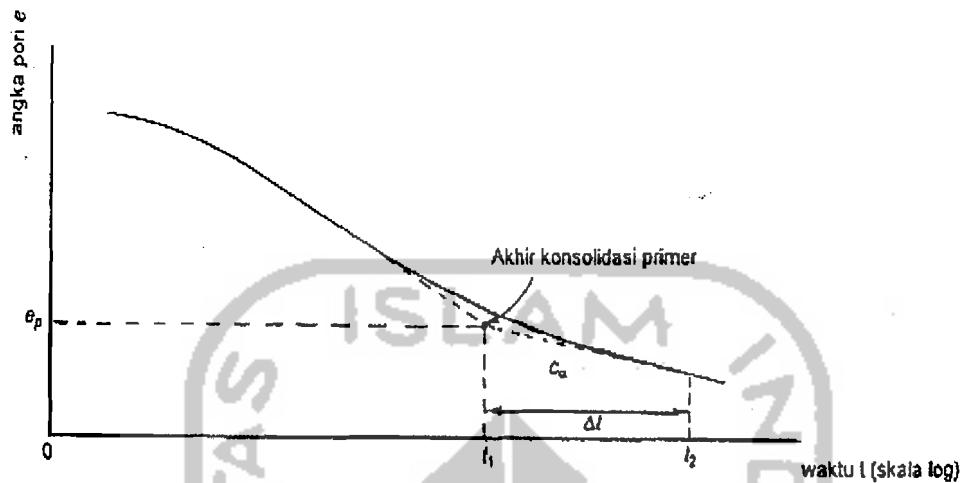
e_p = angka pori saat akhir konsolidasi primer

$t_2 = t_1 + \Delta t$

t_1 = waktu setelah konsolidasi primer terhenti (dt)

Nilai $C\alpha$ dapat diperoleh dari grafik hubungan angka pori (e) terhadap waktu (t).

(Gambar 2.6)



Gambar 2.6 Grafik penentuan indeks pemampatan sekunder C_{α} (Terzaghi, 1948)

II. 3. Dasar-dasar perencanaan pondasi

Hal yang pokok dalam perencanaan pondasi adalah menghitung jumlah beban efektif yang akan ditransfer ke tanah di bawah pondasi. Langkah selanjutnya adalah menentukan nilai daya dukung yang diijinkan (Q_{pq}). Besarnya daya dukung diijinkan (Q_{pq}) tergantung dari sifat-sifat teknis tanah, kedalaman dimensi pondasi dan besarnya penurunan yang ditoleransikan. Perhitungan daya dukung dapat dilakukan berdasar karakteristik kuat geser tanah yang diperoleh dari pengujian tanah dilaboratorium dan pengujian di lapangan atau dengan cara empiris yang didasarkan pada alat pengujian lapangan, misalnya pengujian SPT, sondir dan lain-lain.

Bila perhitungan daya dukung tanah didasarkan pada karakteristik tanah dasar, besar daya dukung ultimit untuk dimensi pondasi dan kedalaman tertentu

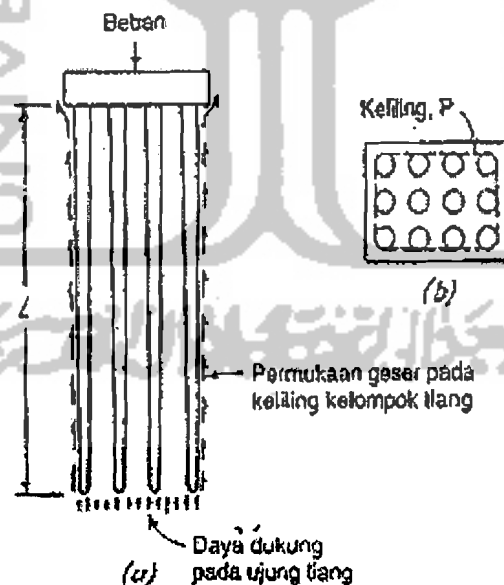
dihitung, kemudian besar daya dukung yang diijinkan ditentukan dengan membagi daya dukung ultimit dengan faktor aman yang sesuai. Hitungan daya dukung yang berdasarkan pada hasil pengujian di lapangan diperoleh dari rumus-rumus empiris hasil pengujian di lapangan.

Perencanaan daya dukung pondasi pada tanah lempung, dilakukan dengan tinjauan analisis tegangan total atau digunakan kuat geser tanpa drainase (c_u), dengan ϕ_u sama dengan nol. Daya dukung ultimit lempung umumnya tidak banyak tergantung pada lebar pondasi. Analisis daya dukung diijinkan untuk pondasi terpisah hanya dapat digunakan jika jarak antara pondasi cukup besar, sehingga pengaruh penyebaran tekanan masing-masing pondasinya tidak mempengaruhi satu sama lain (tidak saling tumpang tindih). Jika jarak antar pondasi kecil, penyebaran tekanan di bawahnya akan identik dengan penyebaran beban kelompok pondasi sebagai satu kesatuan sehingga daya dukung diijinkan harus dipertimbangkan terhadap pengaruh tekanan kelompok pondasi tersebut.

struktur pondasi yang terletak pada lapisan tanah lunak pondasi akan melesak ke bawah sehingga dapat mengakibatkan keruntuhan. Oleh karena itu hitungan daya dukung tanah perlu diperhitungkan terhadap pengaruh penyebaran beban pada lapisan lunak di bawahnya. Hitungan daya dukung dilakukan dengan menganggap beban pondasi disebarkan menurut aturan $2V : 1H$ (2 vertikal : 1 Horizontal) pada tanah lunak. Tekanan pada tanah lunak tidak boleh melampaui daya dukung yang diijinkan dari lapisan lunaknya.

II. 3. 1. Perencanaan pondasi tiang pancang

Pondasi tiang digunakan bila lapisan tanah di bawah permukaan mengandung lempung yang lemah atau kompresibel untuk mendukung beban struktur. Tiang berfungsi meneruskan beban yang bekerja ke lapisan pendukung yang lebih kuat. Pondasi tiang diklasifikasikan menjadi tiang dukungan ujung (*point bearing piles*) dan tiang dukungan gesek (*friction piles*). Tiang-tiang yang dimasukkan sampai ke lapisan tanah keras dianggap bahwa seluruh beban tiang dipindahkan ke lapisan keras melalui ujung tiang, sedangkan tiang gesekan mendapat daya dukung dari gaya gesekan antara tanah dengan tiang atau gaya pelekatan antara tanah dengan permukaan badan tiang (Gambar 2.7).

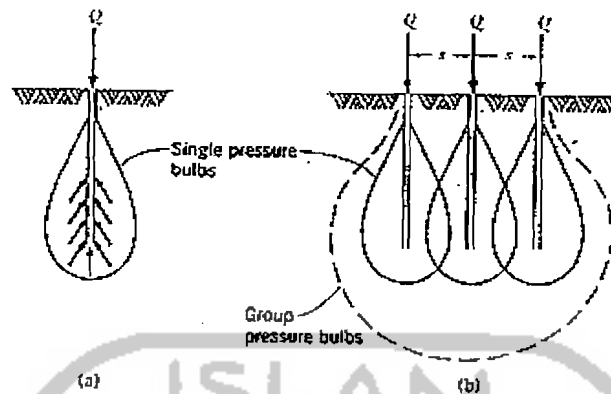


Gambar 2.7 Tiang dukungan ujung dan gesek

Pada keadaan sebenarnya sangat jarang dijumpai sebuah tiang pancang tunggal tetapi merupakan kombinasi sebagai kelompok atau grup. Tiang yang

dipancangkan ke dalam tanah akan selalu mengakibatkan perubahan dalam massa tanahnya. Hal ini juga akan menimbulkan pengaruh terhadap perilaku tiang tidak hanya selama perencanaan tetapi juga selama tiang tersebut mendukung beban yang akan diberikan. Perilaku kelompok tiang secara langsung tidak dapat dianggap sama dengan perilaku tiang tunggal meskipun tiap tiang menahan beban yang sama dan terletak dalam satu lokasi. Di atas kelompok tiang biasanya diletakkan suatu konstruksi *poer* beton bertulang yang mempersatukan kelompok tiang tersebut. Dalam perhitungan-perhitungan *poer* dianggap kaku sempurna sehingga bila beban-beban yang bekerja pada kelompok tiang menimbulkan penurunan maka setelah penurunan bidang *poer* akan merupakan bidang datar dan gaya-gaya yang bekerja pada tiang berbanding lurus dengan penurunan tiang-tiang.

Walaupun tiang menumpu pada lapisan tanah yang cukup baik namun dasar pembagian beban yang sama (merata) harus tetap dipegang agar dapat dihindari hal-hal yang tidak diperkirakan sebelumnya akibat penurunan yang tidak sama. Jarak minimum yang lazim digunakan adalah ketentuan jarak antara masing-masing tiang diukur dari sumbu tiang adalah $3,5 < s \leq 6 D$, dengan s adalah jarak antar tiang dan D adalah diameter tiang (J. E. Bowles, 1991). Pengaturan jarak tiang yang cukup besar dimaksudkan agar tegangan-tegangan yang terjadi pada lapisan tanah tidak akan *overlap* (Gambar 2.8)



Gambar 2.8 Kontribusi tegangan tiang pancang kelompok

II. 3. 2. Daya dukung tiang *friction piles*

Perencanaan pondasi untuk gedung atau bangunan yang lain perlu memperhatikan dua hal utama yaitu daya dukung tanah dan penurunan. Daya dukung tanah adalah kemampuan tanah untuk menahan beban pondasi tanpa terjadi keruntuhan akibat pergeseran (*shear failure*) dan penurunan.

Terdapat dua pendekatan untuk menghitung kapasitas ultimit tiang yaitu metode statis dan metode dinamis. Metode statis menggunakan mekanik tanah untuk menghitung kapasitas dari sifat-sifat tanah dan metode dinamik mengestimasi daya dukung dari data hasil analisis pemancangan tiang. Perhitungan kapasitas tiang statik menggunakan *bearing capacity formula* (formula kapasitas daya dukung) dengan menggunakan parameter-parameter tanah yang diperoleh dari uji lapangan dan uji laboratorium. Parameter-parameter tanah yang dipakai dalam metode statis adalah kohesi (c), sudut gesek (ϕ), berat volume tanah (γ) dan faktor daya dukung (N_c , N_q , N_γ). Nilai dari faktor daya dukung dipengaruhi oleh sudut gesek dalam, bila ϕ besar maka harga daya dukungnya bertambah.

Bila lapisan tanah keras letaknya sangat dalam sehingga pembuatan dan pemancangan tiang sampai ke lapisan tanah keras tersebut sangat sukar dilaksanakan maka dalam hal ini dipergunakan tiang pancang yang daya dukungnya berdasar pada kelekatan tanah dengan tiang. Untuk tanah lempung komponen gesekan diperlakukan sebagai adhesi antara badan tiang dengan tanah. Biasanya dihitung sebagai kuat geser tanpa drainase dikalikan luas permukaan. Karena sifat-sifat kuat geser pada umumnya berubah-ubah sesuai dengan kedalaman, maka tiang dibagi menjadi beberapa bagian vertikal dan menghitung komponen gesekan dari perlawanan sebagai jumlah perlawanan tiap bagian.

Besarnya gaya pelekatan antara tiang dengan tanah diperoleh dari percobaan sondir dengan memakai alat *Bikonus*. alat *Bikonus* ini selain dapat mengukur perlawanan ujung dapat juga mengukur gaya pelekatan antara *konus* dengan tanah. Gaya ini disebut hambatan pelekat dan dalam grafik biasanya angka-angka dijumlahkan sehingga didapat jumlah hambatan pelekat yaitu jumlah pelekatan dari permukaan tanah sampai kedalaman yang bersangkutan.

Secara teoritis kemampuan tiang atau daya dukung tiang dapat didukung dengan persamaan berikut :

1. Berdasarkan hasil sondir

$$Q_t = \frac{O \cdot L \cdot c}{SF} \dots\dots\dots (2.7)$$

dimana : Q_t = daya dukung tiang (kN)

O = keliling tiang (m)

L = kedalaman tiang (m)

c = nilai kohesi (kN/m^2)

SF = angka keamanan

$$2. \quad Q_t = \frac{O \cdot c}{SF} \dots\dots\dots (2.8)$$

(Sardjono, 1991)

Q_t juga dapat dicari dengan persamaan dari *L. D. Wesley, 1977* sebagai berikut ini.

$$Q_t = c \cdot N_c \cdot A + K \cdot c \cdot O \cdot L \dots\dots\dots (2.9)$$

dimana : Q_t = daya dukung tiang (m^2)

A = luas penampang tiang pancang (m^2)

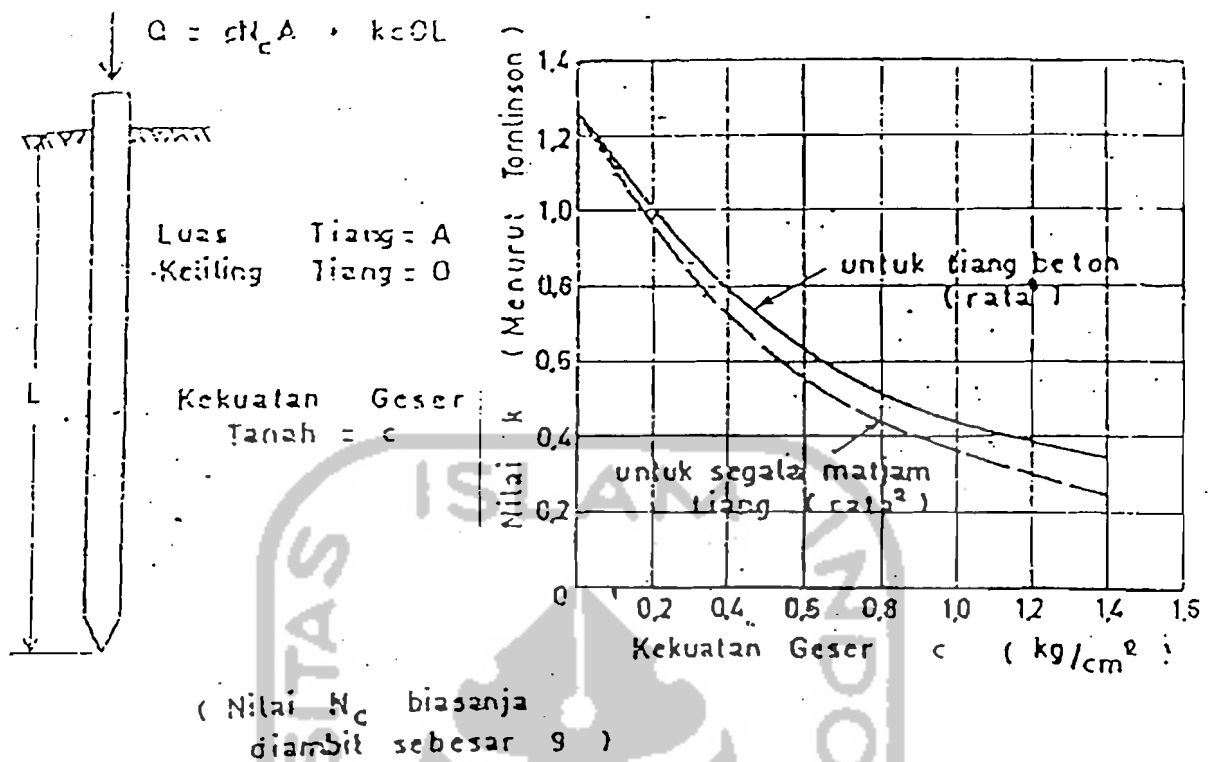
c = nilai kohesi (kN/m^2)

K = nilai perbandingan antara gaya pelekatan dengan kekuatan geser tanah

O = keliling tiang (m)

L = panjang tiang yang masuk ke dalam tanah (m)

N_c = faktor daya dukung



Gambar 2.9 Tiang dengan dukungan gesek dan nilai faktor N_c (L. D. Wesley, 1977)

II. 3. 3. Daya dukung kelompok tiang

Penentuan daya dukung kelompok tiang tidak cukup hanya dengan meninjau daya dukung satu tiang dikalikan dengan jumlah tiang. Kelompok tiang *friction piles* dalam tanah lempung kemungkinan akan mengalami keruntuhan secara keseluruhan (termasuk tanah di antara tiang-tiang). Keruntuhan ini harus ditinjau dalam memperhitungkan daya dukung tiang. Untuk menghitung daya dukung kelompok tiang berdasarkan hasil percobaan sondir dapat menggunakan beberapa perumusan antara lain adalah :

1. Berdasarkan perhitungan daya dukung tanah menurut Direktorat Jendral Binamarga Departemen P. T. U. L.

Perhitungan daya dukung tanahnya berdasarkan pada tekanan maksimum yang dapat ditahan pada dasar kelompok tiang dan perlawanan geser (*shear resistance*) pada permukaan keliling kelompok tiang.

Persamaan daya dukung kelompok tiang tersebut adalah :

$$Q_t = c \cdot N_c \cdot A + 2 (B+Y) \cdot L \cdot c \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

dan gaya dukung kelompok tiang yang diijinkan adalah :

$$Q_{pq} = \frac{Q_t}{SF} = \frac{c \cdot N_c \cdot A + 2 (B+Y) \cdot L \cdot c}{SF} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

dimana : Q_{pq} = daya dukung yang diijinkan pada kelompok tiang (kN)

Q_t = daya dukung keseimbangan kelompok tiang (kN)

c = kohesi (kN/m²)

N_c = faktor daya dukung

A = luas kelompok tiang (m²)

= $B \cdot Y$

Y = panjang kelompok tiang (m)

L = panjang tiang yang masuk ke dalam tanah (m)

2. Berdasarkan efisiensi kelompok tiang

Effisiensi sebuah kelompok tiang adalah perbandingan kapasitas kelompok terhadap jumlah kapasitas masing-masing tiang pancang. Dalam suatu kelompok tiang pancang, misal banyaknya baris adalah n dan banyaknya kolom adalah m , jarak antar tiang adalah s , maka banyaknya tiang pancang adalah $k = m \cdot n$. Garis keliling kelompok tiang tersebut adalah :

$$p = 2 \{ (m-1)s + s(n-1) \} + 8 \cdot D/2 \quad (2.12a)$$

$$\text{atau } p = 2(m+n-2)s + 4D \quad (2.12b)$$

Effisiensi kelompok E_q adalah perbandingan hambatan kulit pada garis keliling kelompok p/L_f terhadap jumlah tahanan kulit masing-masing tiang pancang $\pi D_k/L_f$ atau

$$E_q = \frac{p/L_f}{\pi D_k/L_f} = \frac{p}{\pi D_k} \quad (2.13a)$$

dengan menstutitusikan garis keliling kelompok maka didapat :

$$E_q = \frac{2(m+n-2)s+4D}{mn\pi D} \quad (2.13b)$$

jika diambil effisiensi sebagai 100 persen maka :

$$E_q = \frac{1,57 D m n - 2s}{m + n - 2} \quad (2.14)$$

dimana : s = jarak antara tiang (m)

D = diameter tiang (m)

m = banyak kolom

n = banyak baris

Untuk masing-masing tahan tiang pancang yang akan mengontrol aksi kelompok, maka s seharusnya sama dengan atau lebih besar dari s (persamaan 2.14).

Effisiensi kelompok tiang dihitung dengan persamaan *Converse-Labbarre*

$$E_q = \frac{\theta(n-1)m + (m-1)n}{90 \cdot m \cdot n} \quad (2.13a)$$

dimana : E_q = efisiensi satu tiang dalam kelompok

$$\theta = \text{arc tg } D/s$$

II. 3. 4. Penurunan kelompok tiang pancang

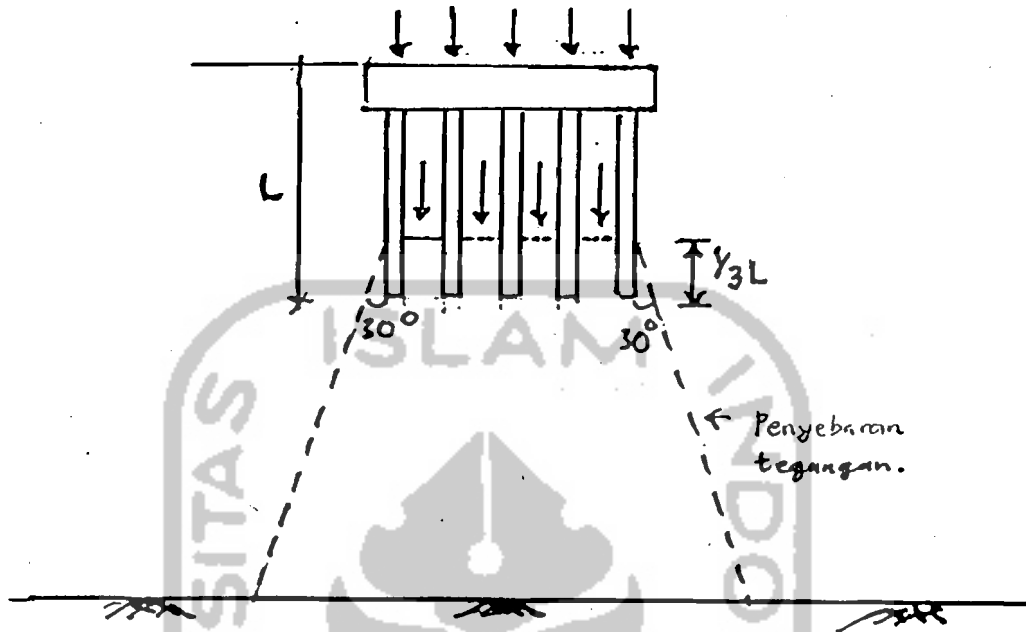
Pondasi yang terletak pada lempung homogen, tidak hanya menyebabkan kompresi tanah tetapi juga menyebabkan luluh lateral tanah di bawah pondasi. Penurunan pondasi dapat disebabkan oleh pemendekan tanah dalam arah vertikal akibat berkurangnya volume tanah dan pengembangan tanah ke arah lateral. Penurunan pondasi pada tanah lempung jenuh merupakan jumlah penurunan segera dan penurunan konsolidasi. Umumnya kecepatan penurunan konsolidasi untuk pondasi pada tanah lempung berlangsung relatif lama. Penurunan tanah lempung disebabkan berkurangnya kadar air, karena permeabilitasnya rendah maka terperasnya air pori meninggalkan lapisan tertekan menuju lapisan yang terletak di atas atau di bawahnya menyebabkan proses penurunan berjalan sangat lambat.

Penurunan yang diijinkan dari suatu bangunan atau besarnya penurunan yang ditoleransikan tergantung pada beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut meliputi jenis, tinggi, kekakuan dan fungsi bangunan, besar dan kecepatan penurunan beserta distribusinya. Faktor aman pondasi pada tanah lempung harus cukup untuk mencegah terjadinya keruntuhan. Tekanan pada tanah di bawah struktur mempunyai faktor aman untuk mencegah keruntuhan yang relatif kecil bila dibandingkan dengan kuat ultimit material, karena itu diperlukan pendekatan untuk mengetahui bagaimana beban didistribusikan ke lapisan bawah tanah.

Peningkatan atau penurunan tekanan pada tengah lapisan lempung dapat menyebabkan konsolidasi atau *swelling* tanah. Beban-beban sementara berpengaruh

kecil pada penurunan struktur di atas lempung. Beban yang perlu dipertimbangkan untuk perhitungan penurunan umumnya adalah tekanan tanah ke atas karena berat tanah yang dipindahkan, beban mati struktur, semua tanah pengisi serta rata-rata beban hidup yang diharapkan terjadi selama umur rencana. Total penurunan dapat diperkirakan dengan derajat ketelitian tinggi jika lapisan bawah tanah adalah lempung dengan pembebanan normal yang sensitif dan mempunyai lapisan homogen.

Dalam perencanaan, penurunan kelompok tiang dalam tanah lempung diperkirakan dengan pembebanan normal. Perlu diperhatikan bahwa keberadaan lempung akan mempengaruhi kompresibilitas tanah, karena alasan ini lempung dibagi menjadi beberapa lapisan di bawah titik tiang dimana beban dianggap akan diteruskan ke bawah. Satu tiang akan turun tidak saja karena beban yang langsung didukung tetapi juga akan turun karena pengaruh tiang-tiang lainnya. Distribusi beban diasumsikan bahwa beban tersebar mulai dari dasar tiang yang letaknya pada kedalaman $\frac{1}{3}$ panjang tiang diukur dari ujung bawah tiang dan mempunyai sudut penyebaran 30° (Gambar 2.10).



Gambar 2.10 Asumsi distribusi tekanan

Analisis penurunan tiang pancang kelompok dapat dilakukan dengan meninjau penurunan yang terjadi dalam jangka waktu dekat (penurunan segera atau penurunan elastis) dan penurunan yang terjadi dalam jangka waktu panjang (penurunan konsolidasi).

Penurunan dalam jangka waktu dekat dapat dicari dengan persamaan dari Janbu, Bjerrum dan Kjaensli berikut ini.

$$S_i = \frac{\mu_0 \cdot \mu_1 \cdot q_n \cdot B}{E} \dots \dots \dots (2.16)$$

dimana : S_i = penurunan segera (m)

q_n = tekanan pondasi netto (kN/m^2)

B = lebar pondasi (m)

E = modulus elastisitas tanah (kN/m^2)

$\mu_0 \cdot \mu_1$ = faktor reduksi (Gambar 2.4)

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam perhitungan penurunan segera ini adalah :

1. Tekanan vertikal pada badan pondasi (q_n) sama dengan jumlah beban yang bekerja pada kelompok dibagi dengan luas dasar pondasi,
2. Pada tanah yang berbeda kompresibilitasnya dimana dalam perhitungan dibagi menjadi beberapa lapisan, maka dasar lapisan terbawah diambil sebagai ketinggian dimana tekanan vertikal telah berkurang hingga menjadi $1/10$ dari q_n .

(Sardjono, 1991)

Penurunan dalam jangka waktu panjang dapat dihitung dengan persamaan

(2.17) yaitu :

$$S_c = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (2.17)$$

dimana : S_c = penurunan konsolidasi (cm)

Δe = nilai perubahan angka pori

e_0 = angka pori awal

