

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Tanah

3.1.1 Tinjauan Umum

Sejarah terjadinya tanah pada mulanya bumi berupa bola magma cair yang sangat panas, dengan adanya pendinginan permukaan membeku maka menjadi batuan beku. Proses fisika (panas,dingin, membeku dan mencair) batuan tersebut hancur menjadi butiran-butiran tanah (sifat-sifatnya tetap seperti batu aslinya: pasir, kerikil, dan lanau). Terjadinya proses kimia (hidrasi dan oksidasi) batuan menjadi lapuk sehingga menjadi tanah dengan sifat berubah dari batu aslinya. Dikenal dengan *Transported Soil*: adalah tanah yang lokasinya pindah dari tempat terjadinya yang disebabkan oleh aliran air, angin, dan es dan *Residual Soil*: adalah tanah yang tidak pindah dari tempat terjadinya oleh proses alam, proses perubahan dapat bermacam-macam dan berulang. Batu menjadi tanah karena pelapukan dan penghancuran, dan tanah bisa menjadi batu karena proses pemadatan (Santosa, dkk, 1998).

Dalam pengertian teknik secara umum, tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong diantara partikel-partikel padat tersebut. Partikel tanah sangat beragam dengan variasi cukup besar, tanah umumnya dapat disebut sebagai kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*). Pada Tabel 3.1 ditunjukkan batasan-batasan ukuran golongan jenis tanah yang telah dikembangkan oleh *Massachutes Institute of Technology (MIT)*, *U. S. Department of Agriculture (USDA)*, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, dan oleh *U. S. Army Corps of Engineers, U. S. Bureau of Reclamation* yang kemudian menghasilkan apa yang disebut sebagai *Unified Soil Classification System (USCS)* (Das, 1988).

Tabel 3.1 Batasan – batasan Ukuran Golongan Tanah

Ukuran butiran (mm)				
Nama golongan	Kerikil	Pasir	Lanau	Lempung
<i>Massachusetts Institute of Technology (MIT)</i>	> 2	2 – 0,06	0,06 – 0,002	< 0,002
<i>U. S. Department of Agriculture (USDA)</i>	> 2	2 – 0,05	0,05 – 0,002	<0,002
<i>American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)</i>	76,2 – 2	2 – 0,075	0,075 – 0,002	<0,002
<i>Unified Soil Classification System (U. S. Army Corps of Engineers, U. S. Bureau of Reclamation)</i>	76,2 – 4,75	4,75 – 0,075	Halus (yaitu lanau dan lempung) < 0,0075.	

Sumber : Das (1988)

3.1.2 Penyelidikan Tanah Secara Umum

Penyelidikan tanah merupakan salah satu bidang geoteknik yang dilakukan untuk memperoleh sifat dan karakteristik tanah dalam kepentingan rekayasa. Terdapat dua jenis penyelidikan tanah yang dapat dilakukan, yaitu penyelidikan lapangan (*in situ test*) dan penyelidikan laboratorium (*laboratory test*). Penyelidikan lapangan umumnya terdiri dari boring seperti *hand boring* atau *machine boring*, *SPT (Standard Penetration Test)*, *CPT*, *DCP (Dynamic Cone Penetration)*, *DMT (Dilatometer Test)*, *Sand cone Test*, dan lain-lain. Sedangkan penyelidikan yang dilakukan di laboratorium terdiri dari uji *index properties* tanah seperti (*water content*, *specific gravity*, *atterberg limit*, *sieve analysis*, *unit wight*,

dan lain-lain) dan uji *index properties* tanah seperti (*direct shear test, consolidation test, triaxial test, permeability test, compaction test, CBR test*, dan lain-lain).

Pemilihan jenis pengujian sangat tergantung kepada jenis konstruksi yang akan dikerjakan di lokasi. Penyelidikan tanah yang dilakukan harus memenuhi standar yang telah diakui secara internasional seperti yang biasa digunakan di Indonesia yaitu *ASTM (American Society for Testing and Material)*. Penyelidikan tanah yang dilakukan bertujuan sebagai berikut :

1. mengetahui *stratigrafi* atau sistem pelapisan tanah di lokasi diperoleh berdasarkan hasil *boring* atau *drilling* di lapangan hingga mencapai kedalaman tanah keras dengan $N-SPT > 50$ untuk jenis tanah pasir dan $N-SPT > 30$ untuk jenis tanah lempung,
2. mengetahui kedalaman muka air tanah (*ground water level*) di lokasi diperoleh dari hasil *boring machine*,
3. mengambil sampel tanah (*undisturbed sample*) dari lokasi untuk dilakukan pengujian laboratorium diperoleh dari *boring machine*,
4. mengetahui sifat fisis tanah di lokasi diperoleh dengan melakukan pengujian sampel dari lapangan di laboratorium seperti *water content, spesific gravity, atterberg limit, sieve analysis*, dan *unit weight*,
5. mengetahui sifat kompressibilitas tanah di lokasi seperti nilai indek kompressibilitas tanah keras (C_c), konstanta konsolidasi (C_v) parameter ini diperoleh dari hasil *consolidation test*,
6. mengetahui kekuatan tanah pada setiap kedalaman tertentu hingga kedalaman tanah keras, diperoleh melalui pengujian *Cone Penetration Test* di lapangan, dan
7. mengetahui kekuatan tanah pada setiap kedalaman tertentu, hal ini dapat diperoleh dari hasil yang dinyatakan dengan jumlah pukulan per 20 cm penetrasi.

Sifat dan karakteristik tanah yang telah diperoleh dapat digunakan sebagai berikut :

1. menentukan daya dukung fondasi dangkal (*shallow foundation*) dan fondasi dalam (*deep foundation*), dan
2. mengevaluasi besarnya penurunan tanah akibat beban kerja baik penurunan segera (*immediatelly settlement*), penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*), dan penurunan setempat (*differential settlement*).

Penyelidikan tanah pada suatu bangunan secara umum dapat dibagi menjadi empat kategori utama, yaitu sebagai berikut.

1. Persiapan Awal

Memisahkan informasi yang telah ada dari bangunan yang akan didirikan informasi ini meliputi tipe bangunan dan penggunaannya. Mengumpulkan informasi yang telah ada untuk kondisi tanah dasar setempat informasi tersebut dapat memberikan gambaran yang lebih dalam tentang jenis dan masalah tanah yang mungkin akan dijumpai pada saat pengeboran tanah yang sebenarnya.

2. Survei Lapangan

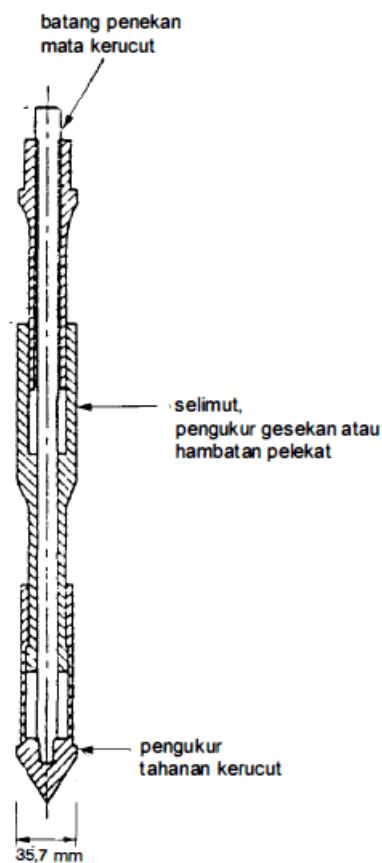
Peninjauan lapangan ke tempat lokasi proyek yang direncanakan.

3. Pemboran

Pelaksanaan beberapa uji pengeboran di lokasi dan pengumpulan sampel tanah asli dan tidak asli dari berbagai kedalaman untuk diinspeksi langsung atau diuji di laboratorium. Ada beberapa metode untuk melaksanakan pengeboran di lapangan. Salah satu yang paling sederhana adalah dengan menggunakan *auger*. Ada juga pengeboran dengan sistem putar (*rotary drilling*), pengeboran sistem cuci (*washing boring*), dan pengeboran sistem tumbuk (*percussion drilling*). Untuk pengambilan sampel tanah dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu dengan menggunakan alat *split spoon standard* dengan tabung berdinding tipis, dan pengambilan sampel tanah dengan alat piston.

3.1.3 Penyelidikan Tanah dengan *Cone Penetration Test (CPT)*

CPT atau dikenal dengan uji sondir merupakan penyelidikan tanah dilapangan yang banyak digunakan di Indonesia. Alat ini terdiri dari kerucut baja yang mempunyai sudut kemiringan 60° dan berdiameter 35,7 mm dengan luas penampang 1000 mm^2 . Bentuk alat ini dapat dilihat pada Gambar 3.1 dibawah ini.



Gambar 3.1 Bentuk Skematis Alat Sondir

(Sumber : Hardiyatmo, 1996)

Alat sondir dibuat sedemikian rupa sehingga dapat mengukur tahanan ujung dan tahanan terhadap gesekan dari selimut silinder mata sondirnya. Cara penggunaan alat ini dengan menekan pipa penekan dan mata sondir secara terpisah, melalui alat penekan mekanis atau dengan tangan yang memberikan gerakan ke bawah. Kecepatan penekanan kira-kira 10 mm/detik. Pembacaan tahanan kerucut statis dilakukan dengan melihat arloji pengukurannya. Nilai q_c adalah besarnya tahanan kerucut dibagi dengan luas penampang. Pembacaan arloji pengukur

dilakukan pada tiap-tiap penembusan sedalam 20 cm. Tahanan ujung serta tahanan gesekan selimut alat sondir dicatat. Dilihat dari kapasitasnya, alat sondir dibagi menjadi dua bagian sondir ringan dengan kapasitas 2 ton dan sondir berat kapasitas 10 ton. Sondir ringan digunakan untuk mengukur tekanan konus sampai 150 kg/cm^2 kedalaman maksimal 30 m biasanya untuk penyelidikan tanah pada tanah lempung, lanau, dan pasir halus. Sedangkan sondir berat dapat mengukur sampai tekanan konus 500 kg/cm^2 dengan kedalaman maksimal 50 m pada tanah lempung padat, lanau padat dan pasir kasar.

Ujung konus memiliki 2 tipe yang terdapat pada sondir mekanis.

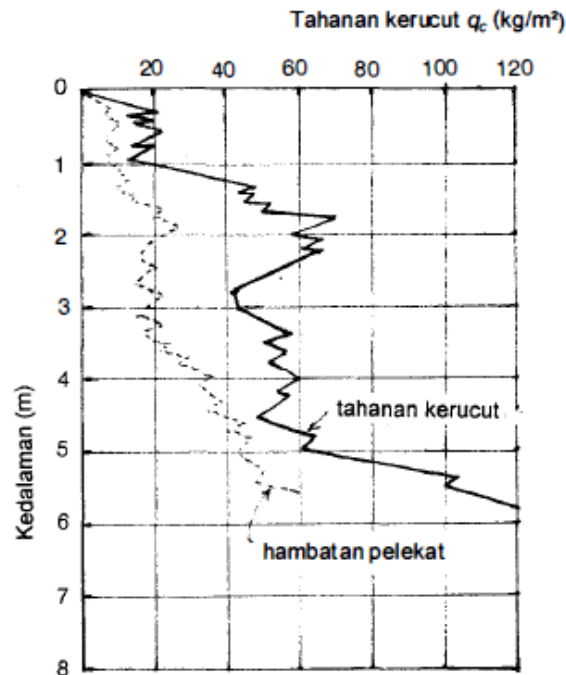
1. Konus biasa.

Diukur melalui perlawanan ujung konus biasa digunakan pada tanah berbutir kasar dimana perlawanan lekatnya kecil.

2. Bikonus

Diukur melalui perlawanan ujung konus dan hambatan lekatnya biasa digunakan pada tanah berbutir halus.

Dari hasil penyelidikan ini diperoleh grafik tahanan kerucut statis atau grafik yang menyajikan nilai perlawanan penetrasi ujung konus dalam gaya per satuan luas. Selanjutnya berupa hambatan lekat perolehan perlawanan geser tanah terhadap selubung bikonus dalam gaya per satuan panjang. Grafik uji sondir dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Grafik Uji Sondir

(Sumber : Hardiyatmo, 1996)

Interpretasi hasil pengujian sondir adalah sebagai berikut :

1. Tahanan ujung (q_c)

Tahan ujung diperoleh dari penekanan ujung konus untuk memperoleh perlawanan tanah yang dipenetrasi. Tahanan ujung diukur sebagai gaya penetrasi persatuan luas penampang ujung konus. Besarnya nilai ini menunjukkan identifikasi jenis tanah pada tanah pasiran, perlawanan ujung yang besar menunjukkan tanah pasir padat. Sedangkan perlawanan ujung kecil menunjukkan pasir halus. Perlawanan ujung yang kecil menunjukkan tanah lempung karena kecilnya kuat geser dan pengaruh tekanan air pori saat penetrasi.

2. Gesekan selimut (f_s)

Gesekan selimut diperoleh dari hasil pengukuran perlawanan ujung konus dan selimut besama-sama ditekan ke dalam tanah dikurang hasil pengukuran tekanan ujung konus dengan kedalaman penetrasi yang sama. Gesekan selimut digunakan untuk menginterpretasikan sifat-sifat tanah untuk klasifikasi tanah

dan memberikan data yang dapat langsung digunakan perencanaan fondasi tiang.

3. *Friction ratio* (fr)

Friction ratio adalah perbandingan antara gesekan selimut (f_s) dengan tahanan ujung (q_c). Rasio gesekan dari hasil sondir dapat digunakan untuk membedakan tanah berbutir halus dengan tanah yang berbutir kasar (memperkirakan jenis tanah yang diselidiki). Di bawah ini adalah nilai *friction ratio* untuk beberapa jenis tanah :

- a. harga *friction ratio* < 1 % biasanya adalah untuk tanah pasir,
- b. harga *friction ratio* > 1 % biasanya adalah untuk tanah lempung, dan
- c. harga *friction ratio* > 5 % atau 6 % untuk jenis tanah organik.

Hasil sondir diperoleh nilai jumlah perlawanan (JP) dan nilai perlawanan konus (PK), sehingga hambatan lekat (HL) dapat dihitung pada Persamaan 3.1 dan Persamaan 3.2.

1. Hambatan Lekat (HL)

$$HL = (JP - PK) \times \frac{A}{B} \quad (3.1)$$

2. Jumlah Hambatan Lekat (JHL)

$$JHL = \sum_{i=0}^n JHL \quad (3.2)$$

dengan :

JP = Jumlah perlawanan, perlawanan ujung konus + selimut (kg/cm^2),

PK = Perlawanan penetrasi konus, q_c (kg/cm^2),

A = Interval pembacaan (setiap kedalaman 20 cm),

B = Faktor alat (luas konus / luas torak) = 10 cm, dan

I = Kedalaman lapisan tanah yang ditinjau (m).

3.2. Fondasi

3.2.1 Fondasi Tiang Pancang

Berdasarkan kedalaman tertanam di dalam tanah, maka fondasi dibedakan menjadi fondasi dangkal dan fondasi dalam. Fondasi dangkal digunakan bila lapisan tanah baik atau lapisan batuan berada di posisi yang dangkal dari atas permukaan bumi. Bila lapisan tanah baik atau lapisan batuan berada pada posisi yang dalam maka digunakan fondasi dalam atau fondasi tiang. Dari beberapa macam tipe fondasi yang dapat dipergunakan salah satu diantaranya adalah fondasi tiang pancang. Pemakaian tiang pancang dipergunakan untuk suatu bangunan apabila tanah dasar dibawah bangunan tersebut tidak mempunyai daya dukung (*bearing capacity*) yang cukup untuk memikul berat bangunan dan bebannya, atau apabila tanah keras yang mempunyai daya dukung yang cukup untuk memikul berat bangunan dan bebannya letaknya sangat dalam. Fondasi tiang digunakan untuk mendukung bangunan bila lapisan tanah kuat terletak sangat dalam. Fondasi tiang juga digunakan untuk mendukung bangunan yang menahan gaya angkat ke atas, terutama pada bangunan-bangunan tingkat tinggi yang dipengaruhi oleh gaya penggulingan akibat beban angin (Hardiyatmo, 2010).

Tiang pancang adalah bagian-bagian konstruksi yang dibuat dari kayu, beton, dan atau baja, yang digunakan untuk meneruskan (mentransmisikan) beban-beban permukaan yang lebih rendah di dalam massa tanah (Bowles, 1981). Fondasi tiang pancang ini berfungsi untuk memindahkan atau mentransferkan beban-beban dari konstruksi di atasnya (*super structure*) ke lapisan tanah yang lebih dalam. Kebanyakan tiang pancang dipancang ke dalam tanah, akan tetapi ada beberapa tipe yang dicor setempat dengan dibuatkan lubang terlebih dahulu dengan mengebor tanah, sebagaimana kalau mengebor untuk penyelidikan tanah.

Pada umumnya tiang pancang dipancang tegak lurus ke dalam tanah, tetapi apabila diperlukan untuk menahan gaya-gaya *horizontal* maka tiang pancang akan dipancang miring (*batter pile*). Sudut kemiringan yang dapat dicapai oleh tiang pancang tergantung daripada alat tiang pancang yang dipergunakan serta disesuaikan pula dengan perencanaannya.

Menurut cara pemindahan beban tiang pancang dibagi 2 yakni sebagai berikut ini.

1. *Point Bearing Pile (End Bearing Pile)*

Tiang pancang dengan tahanan ujung, tiang ini meneruskan beban melalui tahanan ujung ke lapisan tanah keras.

2. *Friction Pile*

Friction Pile pada tanah dengan butir-butir tanah kasar (*coarse grained*) dan sangat mudah dilalui air, tiang ini meneruskan beban ke tanah melalui geseran kulit (*skin friction*). Pada proses pemancangan tiang-tiang ini dalam suatu grup (kelompok) tiang satu dengan lainnya saling berdekatan akan menyebabkan berkurangnya pori-pori tanah dan memadatkan tanah diantara tiang-tiang tersebut dan tanah disekeliling kelompok tiang tersebut disebut "*Compaction Pile*". Begitu pula sebaliknya *friction pile* pada tanah dengan butir-butir sangat halus (*very fine grained*) dan sangat susah dilalui air, tiang ini juga meneruskan beban ke tanah melalui geseran kulit (*skin friction*), akan tetapi kelompok tiang tersebut tidak memadat maka tiang pancang tersebut dikategorikan "*Floating Pile*"

Fondasi tiang digunakan untuk beberapa maksud, antara lain :

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 fondasi bangunan mampu memberikan dukungan yang cukup untuk mendukung beban tersebut oleh gesekan sisi 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 horisontal dan gaya yang arahnya miring,
5. untuk memadatkan tanah pasir sehingga kapasitas dukung tanah tersebut bertambah, dan
6. untuk mendukung fondasi bangunan yang permukaan tanahnya mudah tergerus air.

Tiang pancang (*driven pile*) dipasang dengan cara membuat bahan berbentuk bulat atau bujursangkar memanjang yang dicetak terlebih dahulu dan kemudian dipancang atau ditekan ke dalam tanah. Tiang pancang disisipkan ke dalam tanah dengan sejumlah metode (Bowles, 1981) berikut :

1. dorongan dengan pukulan berurutan secara tetap pada puncak tiang pancang dengan menggunakan sebuah martil tiang pancang. Cara ini menghasilkan banyak suara berisik dengan getaran setempat yang mungkin tidak diperbolehkan oleh kode (aturan) setempat atau badan-badan yang memelihara keadaan lingkungan dan sudah tentu dapat merusak hak milik yang dekat dengan tempat tersebut,
2. dorongan yang menggunakan alat penggetar yang ditempelkan (diikatkan) di puncak tiang pancang. Secara relatif cara ini lebih sedikit mengeluarkan suara berisik dan getaran pendorong mungkin tidak berlebihan. Metoda tersebut lebih terpakai di dalam endapan-endapan yang kohesinya kecil,
3. dengan mendongkrak tiang pancang. Cara ini lebih terpakai untuk bagian-bagian kaku yang pendek, dan
4. dengan membor sebuah lobang dan baik menyisipkan sebuah tiang pancang ke dalamnya, maupun lebih umum lagi, dengan mengisi rongga dengan beton yang menghasilkan sebuah tiang pancang setelah dikeraskan.

Menurut Hardiyatmo (2010), beberapa keuntungan pemakaian tiang pancang, antara lain :

1. bahan tiang dapat diperiksa sebelum pemancangan,
2. prosedur pelaksanaan tidak dipengaruhi oleh air tanah,
3. tiang dapat dipancang sampai kedalaman yang dalam, dan
4. pemancangan tiang dapat menambah kepadatan tanah granuler.

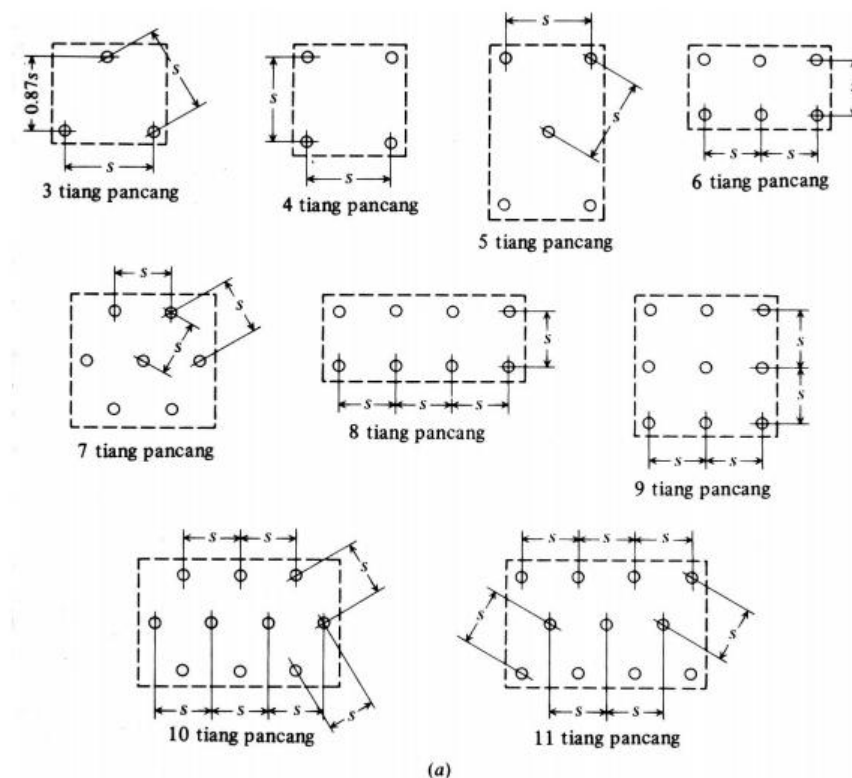
Sedangkan beberapa kerugian pemakaian tiang pancang, antara lain :

1. penggembungan permukaan tanah dan gangguan tanah akibat pemancangan dapat menimbulkan masalah,
2. kepala tiang kadang-kadang pecah akibat pemancangan,
3. pemancangan sulit, bila diameter tiang terlalu besar,
4. pemancangan menimbulkan kerusakan bangunan disekitarnya, dan

5. banyaknya tulangan dipengaruhi oleh tegangan yang terjadi pada waktu pengangkutan dan pemancangan tiang.

3.2.2 Fondasi Kelompok Tiang

Pada keadaan sebenarnya jarang sekali didapat tiang pancang yang berdiri sendiri (*single pile*), akan tetapi kita sering mendapatkan fondasi tiang pancang dalam bentuk kelompok (*pile group*). Pola kelompok tiang untuk tiang pancang dapat dilihat pada Gambar 3.3.



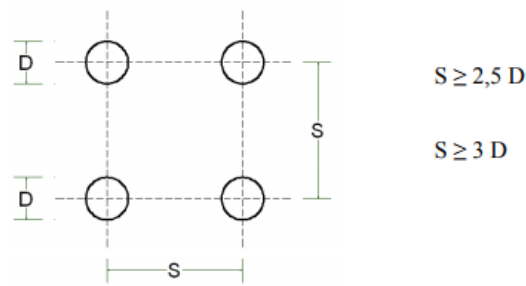
Gambar 3.3 Pola Kelompok Tiang Untuk Kaki Tunggal

(Sumber: Bowles, 1991)

Untuk mempersatukan tiang-tiang pancang tersebut dalam satu kelompok tiang biasanya diatas tiang tersebut diberi poer (*footing*). Dalam perhitungan poer dianggap/dibuat kaku sempurna, sehingga:

1. bila beban-beban yang bekerja pada kelompok tiang tersebut menimbulkan penurunan, maka setelah penurunan bidang poer tetap merupakan bidang datar, dan
2. gaya yang bekerja pada tiang berbanding lurus dengan penurunan tiang-tiang.

Jarak antar tiang kelompok yang disyaratkan oleh Dirjen Bina Marga Departemen P.U.T.L dalam Sardjono (1991) adalah sebagai berikut ini. Ditampilkan juga jarak dan pengaruh pemancangan pada Gambar 3.4 dan Gambar 4.5.



Gambar 3.4 Jarak Antar Tiang

(Sumber : Sardjono, 1991)

dengan :

S = Jarak masing –masing tiang dalam kelompok (*spacing*), dan

D = Diameter tiang.

Jarak antara 2 tiang dalam kelompok diisyaratkan minimum 0,60 m dan maksimum 2,00 m. Ketentuan ini berdasarkan pada pertimbangan-pertimbangan berikut ini.

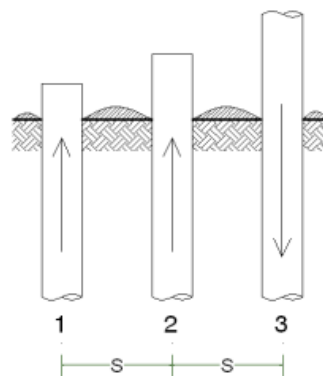
1. Bila $S < 2,5 D$

Pada pemancangan tiang akan menyebabkan:

- a. kemungkinan tanah di sekitar kelompok tiang akan naik terlalu berlebihan karena terdesak oleh tiang-tiang yang dipancang terlalu berdekatan, dan
- 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 atau dimensi dari poer (*footing*). Pada perencanaan fondasi 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 fondasi setempat dengan poer di atas kelompok tiang pancang, dan bila luas poer total diperlukan lebih besar daripada setengah luas bangunan maka biasanya kita pilih fondasi penuh (*raft foundation*) di atas tiang pancang.



Gambar 3.5 Pengaruh Tiang Akibat Pemancangan

(Sumber : Sardjono, 1991)

3.3. Kapasitas Dukung Fondasi

Kapasitas dukung tiang adalah kemampuan atau kapasitas tiang dalam mendukung beban. Hitungan kapasitas dukung tiang dapat dilakukan dengan cara pendekatan statis dan dinamis. Hitungan kapasitas dukung tiang secara statis dilakukan menurut teori mekanika tanah, yaitu dengan mempelajari sifat-sifat teknis tanah, sedang hitungan dengan dinamis dilakukan dengan menganalisis kapasitas ultimit dengan data yang diperoleh dari data pemancangan tiang (Hardiyatmo, 2010).

3.3.1 Kapasitas Dukung Fondasi Tiang Pancang

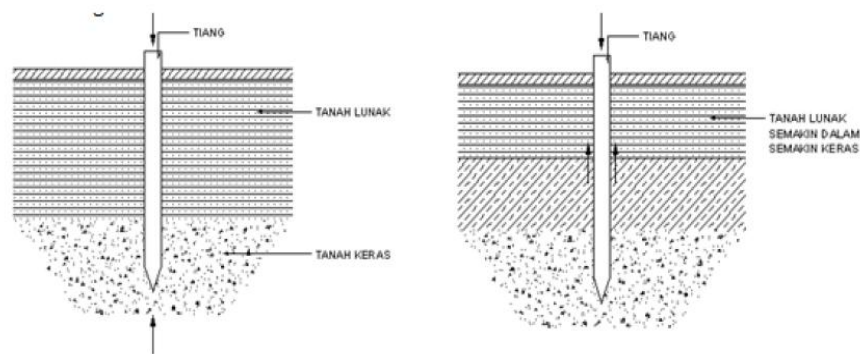
Berdasarkan dari cara mendukung beban, tiang dapat dibagi menjadi 2 (dua) macam (Hardiyatmo, 2002), yaitu :

1. Tiang gesek (*friction pile*)

Tiang gesek (*friction pile*) adalah tiang yang kapasitas dukungnya lebih ditentukan oleh perlawanan gesek antara dinding tiang dan tanah disekitarnya.

2. Tiang dukungan ujung (*end bearing pile*)

Tiang dukung ujung (*end bearing pile*) adalah tiang yang kapasitas dukungnya ditentukan oleh tahanan ujung tiang. Umumnya tiang dukung ujung berada dalam *zone* tanah yang lunak yang berada diatas tanah keras. Tiang-tiang dipancang sampai mencapai batuan dasar atau lapisan keras lain yang dapat mendukung beban yang diperkirakan tidak mengakibatkan penurunan berlebihan. Kapasitas tiang sepenuhnya ditentukan dari tahanan dukung lapisan keras yang berada dibawah ujung tiang. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 3.6 tiang ditinjau dari cara mendukung bebannya.



Gambar 3.6 Tiang Ditinjau Dari Cara Mendukung Bebannya

(Sumber : Hardiyatmo, 2010)

3.3.2 Kapasitas Dukung Tiang Hasil Sondir (*CPT*)

Hardiyatmo (2010) menyatakan, kapasitas dukung tiang dapat diperoleh dari data uji kerucut statis (*CPT*) atau sondir. Kapasitas dukung ultimit neto pada tanah granuler (Q_u), dihitung dengan Persamaan 3.3.

$$Q_u = Q_b + Q_s - W_p = A_b f_b + A_s f_s - W_p \quad (3.3)$$

dengan :

- A_b = luas ujung bawah tiang,
- A_s = luas selimut tiang,
- f_b = tahanan ujung satuan tiang,
- f_s = tahanan gesek satuan tiang, dan
- W_p = berat tiang.

Kapasitas dukung ultimit tiang pada tanah kohesif (Q_u), dihitung dengan Persamaan 3.4.

$$Q_u = Q_b + Q_s = A_b f_b + A_s f_s \quad (3.4)$$

dengan :

- A_b = luas ujung bawah tiang,
- A_s = luas selimut tiang,
- f_b = tahanan ujung satuan tiang, dan
- f_s = tahanan gesek satuan tiang.

3.3.3 Kapasitas Dukung Kelompok Tiang

Fondasi tiang umumnya dipasang secara berkelompok dimana sekumpulan tiang yang dipasang secara relatif berdekatan dan diikat menjadi satu bagian dengan *pile cap*. Untuk menghitung kapasitas dukung kelompok Sardjono (1991) menyatakan seperti halnya pada tiang pancang yang berdiri sendiri (*single pile*), maka tiang pancang dalam kelompok (*pile group*) menurut cara pemindahan beban dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3.5 berikut :

$$Q_{pg} = n \times Q_s \quad (3.5)$$

dengan :

- Q_{pg} = daya dukung kelompok tiang,
- Q_s = daya dukung tiang tunggal, dan
- n = banyaknya tiang pancang.

3.3.4 Faktor Keamanan

Untuk memperoleh kapasitas izin tiang, maka diperlukan untuk membagi kapasitas ultimit tiang dengan faktor aman tertentu. Fungsi faktor aman (Hardiyatmo, 2010) adalah :

1. untuk memberikan keamanan terhadap ketidakpastian dari nilai kuat geser dan kompresibilitas yang mewakili kondisi lapisan tanah,
2. untuk meyakinkan bahwa penurunan tidak seragam diantara tiang-tiang masih dalam batasan-batasan toleransi,
3. untuk meyakinkan bahwa bahan tiang cukup aman dalam mendukung beban yang bekerja,
4. untuk meyakinkan bahwa penurunan total yang terjadi pada tiang tunggal atau kelompok tiang masih dalam batasan-batasan toleransi, dan
5. untuk mengantisipasi adanya ketidakpastian metode hitungan yang digunakan.

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

Variasi besarnya faktor aman yang telah banyak digunakan untuk perancangan tiang pancang, berikut adalah nilai faktor aman pada tiang pancang dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Faktor Aman Tiang Pancang

Informasi dalam perancangan			Faktor aman (F)	
Uji beban statis	Kondisi tanah	Program penyelidikan lokasi	Beban ke bawah (tiang tekan)	Beban ke atas (tiang tarik)
Ya	Seragam	Teliti	2,0*	3,0*
Ya	Tak teratur	Rata-rata	2,5	4,0
Tidak	Seragam	Teliti	2,5	5,0
Tidak	Seragam	Rata-rata	3,0	6,0
Tidak	Tak teratur	Teliti	3,0	6,0
Tidak	Tak teratur	Rata-rata	3,5	6,0

* Jika uji beban statis sangat teliti dan kondisi sifat-sifat tanah dapat didefinisikan dengan baik, faktor aman beban ke bawah dapat direduksi 1,7 kalinya dan beban ke atas 2,5 kalinya.

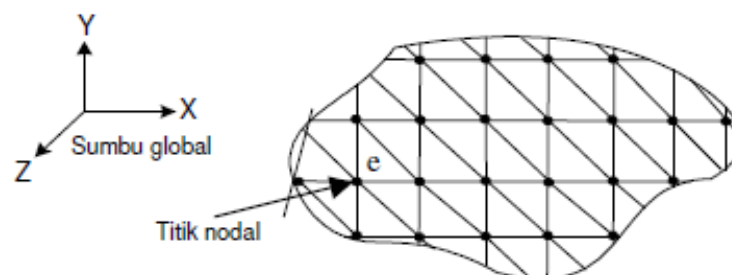
Sumber : Hardiyatmo (2010)

3.4 Metode Elemen Hingga

3.4.1 Pendahuluan

Metode elemen hingga adalah prosedur numeris yang dapat dipakai untuk menyelesaikan masalah dalam bidang rekayasa (*engineering*) dalam geoteknik paling banyak dalam analisa tegangan. Ide dasar metode elemen hingga untuk analisis tegangan adalah sebuah rangkaian diwakili oleh sejumlah elemen-elemen yang dihubungkan hanya pada titik simpul elemen (sendi) . Analisis dari kumpulan elemen hingga dilakukan untuk menyelesaikan perpindahan titik simpul yang tidak diketahui. Metode elemen hingga adalah istilah diskritisasi, yaitu suatu proses untuk membagi kontinum menjadi sistem yang lebih kecil dan ekuivalen yang disebut elemen hingga. Masing-masing elemen akan saling berpotongan pada titik nodal pada Gambar 3.7. Pada pembagian elemen tergantung karakteristik kontinum yang dipilih. Untuk elemen satu dimensi digunakan elemen garis, untuk dua dimensi digunakan elemen segitiga atau segiempat sedangkan untuk tiga dimensi digunakan elemen *tetrahedral* atau *hexahedral*.

Pada metode elemen hingga, masing-masing tipe elemen dianalisis secara tersendiri menggunakan persamaan konstitutif, sehingga persamaan sifat dan kekakuan masing-masing tipe elemen diformulasi. Hasil analisis masing-masing elemen tersebut secara berurutan dirakit untuk mendapatkan persamaan total (*assembly matrix*).



Gambar 3.7 Diskritisasi Struktur dalam Sumbu Global

(Sumber : Twoplus Soft Co.,Ltd , 2012)

3.4.2 *Plaxis 3D Foundation*

Plaxis 3D Foundation adalah program elemen hingga tiga dimensi yang dikembangkan khusus untuk analisis struktur fondasi yang menggabungkan prosedur input grafis sederhana, memungkinkan pengguna untuk secara otomatis menghasilkan model elemen hingga yang kompleks, sehingga membantu ahli geoteknik dalam menganalisis deformasi dan stabilitas dalam bidang rekayasa geoteknik. Untuk setiap proyek baru yang akan dianalisis, penting untuk terlebih dahulu membuat model geometri. Model geometri adalah representasi 3D (tiga dimensi) yang nyata dari model yang mendekati sesungguhnya. Model terdiri dari komponen titik, komponen garis serta komponen kluster. Sebuah model geometri yang lengkap akan meliputi massa tanah yang dapat dibagi menjadi lapisan-lapisan tanah yang berbeda, elemen-elemen struktural, tahapan-tahapan konstruksi serta pembebanan. Guna (2015) menyatakan ukuran model harus dibuat cukup besar sedemikian rupa sehingga batas-batas model tidak mempengaruhi hasil dari permasalahan yang dianalisis. Komponen utama dalam model geometri dijelaskan dengan lebih detail berikut ini.

1. *Boreholes* (Lubang bor)

Lubang bor adalah objek dalam model geometri, menentukan permukaan tanah, lapisan tanah dan muka air di lokasi tertentu. Beberapa lubang bor dapat digunakan untuk menentukan stratigrafi tanah untuk proyek. Jika lubang bor ini dibuat lebih dari 1 (satu) lubang bor maka dapat digunakan untuk stratifikasi lapisan tanah pada proyek tersebut.

2. *Work planes* (Pesawat kerja)

Work planes adalah bidang horisontal, dengan koordinat y yang berbeda, menampilkan model geometri *top-view* pada tingkat vertikal yang ditentukan. Mereka digunakan untuk menciptakan beban dan struktur dalam model. Setiap bidang kerja memiliki garis geometri yang sama, namun jarak antara bidang kerja dapat bervariasi, seperti yang didefinisikan oleh masukan koordinat y. *Work planes* dapat digunakan untuk mengaktifkan atau menonaktifkan beban titik, beban saluran, beban terdistribusi atau elemen struktural.

3. *Points* (Titik)

Points atau titik akan membentuk garis awal dan akhir. Titik-titik ini juga dapat digunakan untuk menempatkan beban terpusat, jenis perletakan dan untuk penghalusan jaring elemen secara lokal atau setempat.

4. *Lines* (Garis)

Garis digunakan untuk menentukan batas fisik suatu geometri, kontur stuktur dan diskontinuitas yang mungkin terdapat dalam geometri seperti dinding dan plat, atau area penggalian batas dari lapisan tanah yang berbeda atau batas dari tahapan-tahapan konstruksi. Baris bisa memiliki beberapa fungsi dan sifat yang berbeda sekaligus.

5. *Clusters* (Klaster)

Klaster adalah area yang sepenuhnya oleh garis dan membentuk suatu polygon tertutup. *Plaxis* secara otomatis akan mengenali klaster berdasarkan posisi dari garis-garis yang dibuat dalam setiap klaster sifat tanah adalah homogen, sehingga klaster-klaster dapat dianggap sebagai bagian-bagian yang membentuk lapisan tanah. Setiap tindakan yang berhubungan dengan suatu klaster akan berlaku juga dalam setiap elemen dalam klaster tersebut.

Setelah sebuah model geometri terbentuk, maka suatu model elemen hingga secara otomatis dibentuk dengan berdasarkan komposisi dari klaster-klaster dan garis-garis yang memebentuk model geometri tersebut. Dalam sebuah jaring elemen hingga, dapat dibedakan tiga buah komponen penyusunannya yang dijelaskan sebagai berikut.

1. *Elements* (Elemen)

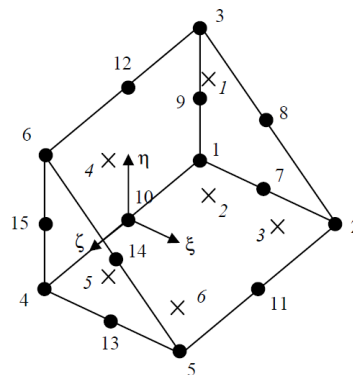
Saat proses penyusunan jaring elemen, setiap klaster dibagi-bagi menjadi elemen-elemen segitiga. Geometri dibagi menjadi 15 titik nodal, unsur-unsur ini terdiri dari 6 titik nodal segitiga dibidang kerja, seperti yang dihasilkan oleh *generate mesh 2D*, dan 8 titik nodal segi empat dalam arah y. Selain elemen-elemen segitiga yang umumnya digunakan untuk membentuk model dari lapisan tanah, elemen plat, serta elemen antar muka yang kompatibel dapat digunakan untuk memodelkan perilaku struktural maupun interaksi tanah-struktur.

2. *Nodes* (Titik nodal)

Sebuah elemen dalam program *Plaxis 3D* terdiri dari 15 titik nodal seperti ditunjukkan pada Gambar 3.8. Elemen-elemen yang bersebelahan akan saling menyatu pada titik-titik nodal milik bersama (*common nodes*). Dalam proses perhitungan elemen hingga, perpindahan (U_x , U_y dan U_z) yang terjadi dihitung pada setiap titik nodal.

3. *Stress points* (Titik tegangan)

Berbeda dengan perpindahan yang dihitung pada titik nodal, tegangan dan regangan yang terjadi dihitung pada setiap titik integrasi *Gauss* yang disebut sebagai titik regangan. Sebuah elemen 15 titik nodal memiliki 6 titik tegangan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Distribusi Nodal (.) dan Titik Tegangan (X) dalam Elemen 15 Nodal

(Sumber : *Twoplus Soft Co.,Ltd*, 2012)

Pada proses simulasi dalam *Plaxis* terdiri dari 3 tahap.

1. *Input data* : yaitu proses membuat dan memodifikasi geometri model sehingga menghasilkan model elemen hingga yang sesuai dengan kondisi aslinya.
2. *Perhitungan* : yaitu suatu proses dimana pemodelan yang dibuat sudah jadi, kemudian kita perlu melakukan pemilihan tipe perhitungan yang sesuai.
3. *Output program* : yaitu suatu hasil perhitungan dimana perhitungan dilakukan hingga mencapai keseimbangan. Keluaran hasil *output* program berupa deformasi *mesh*, penurunan, besarnya tegangan-tegangan yang terjadi, serta gaya-gaya dalam dari struktur yang dimodelkan.

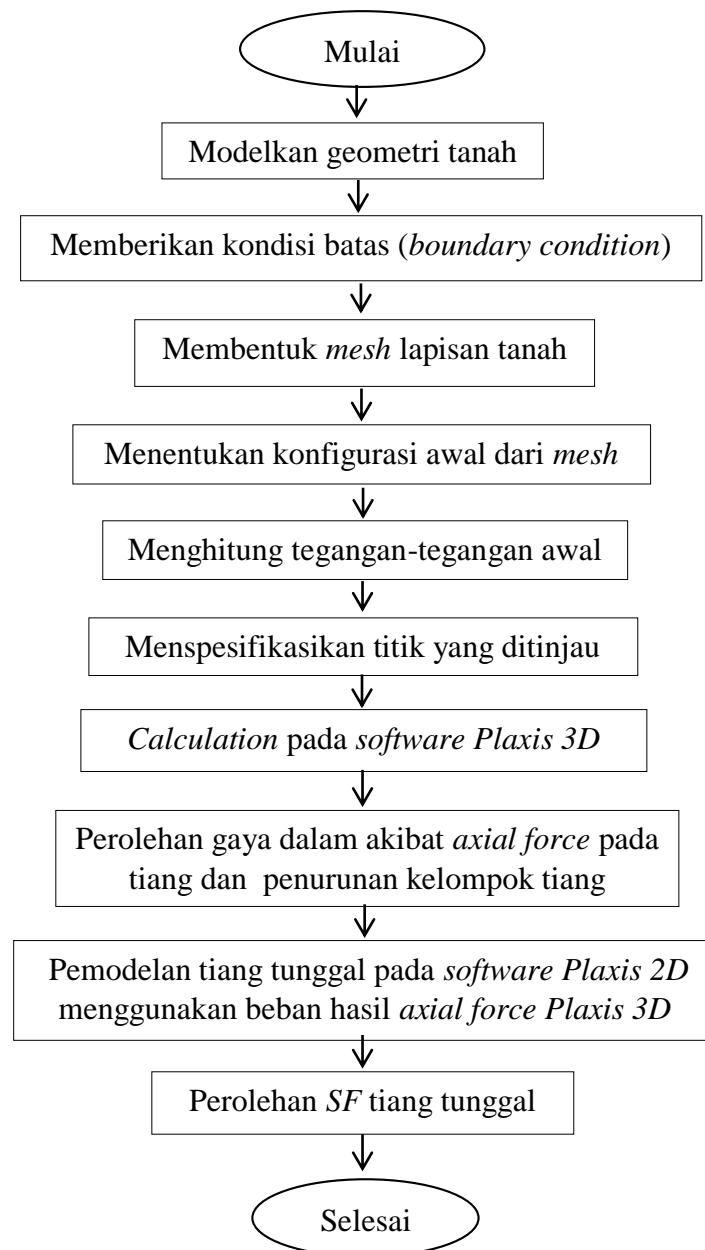
3.4.3 *Plaxis 2D*

Sama halnya dengan *Plaxis 3D*, *Plaxis 2D* merupakan program elemen hingga untuk aplikasi geoteknik dalam tampilan dua dimensi menggunakan model tanah untuk melakukan simulasi terhadap perilaku tanah. Dapat memodelkan kondisi sesungguhnya dalam regangan bidang maupun secara axisymetris. *Plaxis 2D* juga menerapkan metode antarmuka grafis yang mudah untuk digunakan sehingga pengguna dapat dengan cepat membuat model geometri dan jaring elemen berdasarkan penampang melintang.

Untuk proses simulasi pada *Plaxis 2D* terdiri dari 3 tahapan.

1. *Input data* : yaitu proses membuat dan memodifikasi geometri memodel sehingga menghasilkan model elemen hingga yang sesuai dengan kondisi aslinya. Memasukan parameter input berupa data tanah, pemodelan tiang, dan pemodelan beban.
2. Perhitungan : yaitu suatu proses dimana pemodelan yang dibuat sudah jadi, kemudian kita perlu melakukan pemilihan tipe perhitungan yang sesuai berupa *general calculation setting*, *calculation control parameters*, *load multiplier*, *stage construction*, dan *phi-c reduction* untuk mendapatkan *SF*.
3. *Output program* : yaitu suatu hasil perhitungan dimana perhitungan dilakukan hingga mencapai keseimbangan. Keluaran hasil *output* program berupa deformasi *mesh*, penurunan, dan *SF*.

Penggunaan *Plaxis 2D* lebih khususnya untuk mencari faktor keamanan guna perhitungan kapasitas dukung fondasi yang dimodelkan dengan program *Plaxis 3D* sebelumnya. Faktor aman di *Plaxis 2D* umumnya didefinisikan sebagai perbandingan dari beban runtuh terhadap beban kerja. Definisi ini tepat untuk fondasi, tetapi tidak tepat untuk turap maupun timbunan. Dalam *Plaxis* ini faktor keamanan dapat diperoleh dari prosedur analisis “Reduksi *phi-c*”. Untuk bagan alir perhitungan dengan *software Plaxis* dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Bagan Alir Desain Fondasi dengan *Software Plaxis*

3.5 Metode Meyerhof

Meyerhof (1956) menemukan metode empiris berdasarkan korelasi antara *Standard Penetration Test (SPT)* dan *Cone Penetration Test (CPT)*, analisa dilakukan dari hasil *loading test* dan uji *CPT*. Meyerhof menemukan sebuah metode untuk mengestimasi komponen daya dukung (f_p dan q_b) untuk tiang pancang dari q_c dan f_s . Meyerhof (1976) mengamati efek dari pemancangan pondasi dalam lapisan tanah yang berbeda jenisnya. Meyerhof mengembangkan hasil uji *CPT* dan *loading test* pada tiang pancang dan tiang bor untuk menyajikan persamaan desain dan grafik yang akurat, dimana efek dari diameter ujung tiang juga diperhitungkan.

Hardiyatmo (2010) menyatakan Meyerhof (1976; 1963) dan Fellinius (1990) mengusulkan persamaan untuk menentukan kapasitas dukung tiang pada tanah pasir sebagai berikut ini.

1. Tahanan ujung

$$f_b = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot q_{ca} \quad (3.8)$$

dengan :

f_b = tahanan ujung satuan,

q_{ca} = q_c rata-rata (kN/m^2) pada zona $1d$ di bawah ujung tiang dan $4d$ di atasnya,

ω_1 = koefisien modifikasi pengaruh skala, jika $d < 0,5$ m, $\omega_1 = 1$,

ω_2 = koefisien modifikasi untuk penetrasi tiang dalam lapisan pasir padat, jika $L > 10d$, $\omega_2 = 1$,

d = diameter tiang / ukuran tiang (m), dan

L = kedalaman penetrasi tiang di dalam lapisan pasir padat (m).

$$Q_b = A_b \cdot f_b \quad (3.9)$$

dengan :

Q_b = tahanan ujung ultimit (kN),

A_b = luasan penampang tiang (m^2), dan

f_b = tahanan ujung satuan (kPa).

2. Tahanan gesek ultimit

$$f_s = K_c \cdot q_c \text{ dengan } K_c = 0,005 \quad (3.10)$$

$$Q_s = A_s \cdot f_s \quad (3.11)$$

dengan :

f_s = tahanan gesek satuan (kPa),

A_s = keliling tiang dikalikan dengan panjang tiang (m²), dan

Q_s = tahanan gesek ultimit tiang (kN).

3. Kapasitas dukung ultimit tiang

$$Q_u = Q_b + Q_s \quad (3.12)$$

dengan :

Q_b = tahanan ujung ultimit (kN)

Q_s = tahanan gesek ultimit tiang (kN)

4. Kapasitas dukung izin

$$Q_{izin} = \frac{Q_{ult}}{SF} \quad (3.13)$$

dengan :

Q_{izin} = Kapasitas daya dukung izin fondasi, dan

SF = *Safety factor* yang digunakan.

5. Kapasitas Kelompok Tiang

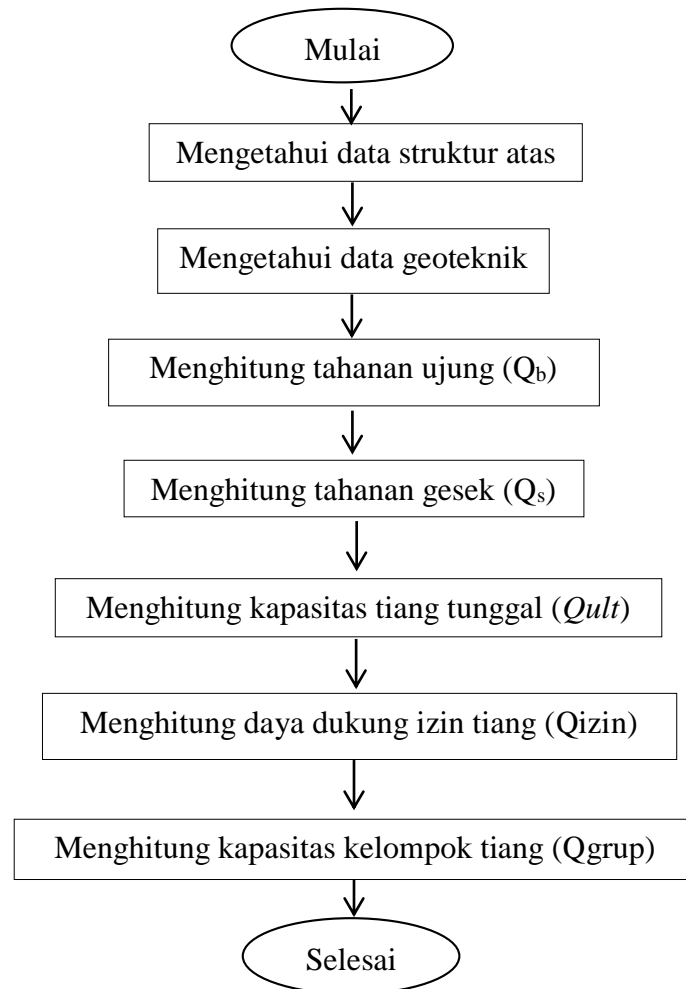
$$Q_{grup} = Q_{ult} \times n \text{ total tiang} \quad (3.14)$$

dengan :

n = jumlah tiang, dan

Q_{ult} = Kapasitas dukung ultimit tiang tunggal.

Bagan alir perhitungan dengan metode *Meyerhof* dapat dilihat pada Gambar 3.10 di bawah ini.



Gambar 3.10 Bagan Alir Perhitungan Kapasitas Dukung dengan Metode *Meyerhof*

3.6 Penurunan

Kelompok tiang (*pile group*) ujung atas berupa tiang-tiang dihubungkan satu dengan yang lain dengan *poer* yang kaku, sehingga merupakan satu kesatuan yang kokoh (Hardiyatmo, 2010). Dengan *poer* ini diharapkan bila kelompok tiang tersebut dibebani secara merata akan terjadi *settlement* yang merata pula. Penurunan kelompok tiang selalu lebih besar dari pada penurunan sendiri terhadap beban yang sama. Beban yang sama penurunan kelompok tiang akan lebih besar bila jumlah bertambah. Penurunan izin dari suatu bangunan atau besarnya penurunan yang telah ditoleransikan bergantung terhadap beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut meliputi jenis, tinggi, kekakuan, fungsi bangunan serta distribusinya. Rancangan dibutuhkan untuk dapat memperkirakan besarnya penurunan maksimum dan beda penurunan. Karena penurunan dapat diprediksi, umumnya dapat diadakan hubungan antara penurunan izin dengan penurunan maksimum. *Skempton* dan *MacDonald* (1955), menyarankan batas-batas penurunan maksimum seperti yang masih dalam batas toleransi dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Batas Penurunan Maksimum (*Skempton* dan *MacDonald*, 1955)

Jenis fondasi	Batas penurunan maksimum (mm)
Fondasi terpisah pada tanah lempung	65
Fondasi terpisah pada tanah pasir	40
Fondasi rakit pada tanah lempung	65-100
Fondasi rakit pada tanah pasir	40-65

Sumber : Hardiyatmo (2010)

Penurunan kelompok tiang dengan metode *Meyerhof* pada tanah pasir berdasarkan data sondir (*CPT*) dapat diperoleh dengan persamaan berikut.

$$S_g = \frac{q \cdot B_g \cdot I}{2q_c} \quad (3.15)$$

$$I = \left[1 - \frac{L}{8 \cdot B_g} \right] \geq 0,5$$

$$S_{izin} = 10 \% \cdot D \quad S_g < S_{izin} \quad (3.16)$$

dengan :

q = Tekanan pada dasar fondasi,

B_g & L_g = Lebar dan panjang kelompok tiang,

q_c = nilai konus kedalaman B_g, dan

I = faktor pengaruh > 0,5.