BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Sutria Hartiwi (2019), dengan lokasi penelitian di Gedung Rumah Sakit Umum Jeumpa Kota Pontianak yang membandingkan *mini pile* 25 cmx 25 cm, *spun pile* diameter 30 cm dan *bore pile* diameter 60 cm. Dari penelitian yang dilakukan didapatkan daya dukung izin (*Qall*) terkecil tiang pancang pada kedalaman pemancangan 30 m berdasarkan metode Schmermant (1967) yaitu daya dukung izin mini pile 490,767 kN, daya dukung izin spun pile 477,616 kN, sedangkan daya dukung bore pile terkecil diperoleh berdasarkan metode Aoki dan Velloso (1975) yaitu 367,476 kN. Dari hasil yang didapat daya dukung izin mini pile lebih besar dibandingkan spun pile dan bore pile, selain itu dari analisa yang dilakukan oleh Sutria Hartiwi (2019) diketahui bahwa jarak antar tiang sangat berpengaruh terhadap efiesisensi kelompok tiang. Sutria Hartiwi (2019) menggunakan metode analytical hierarcy process (AHP) untuk mendapatkan yang paling optimal diantara fondasi tiang, diperoleh bahwa fondasi yang terbaik adalah fondasi mini pile.

Penelitian lain yang berhubungan dengan fondasi tiang pancang adalah penelitian yang dilakukan oleh Mayangsari (2018) didapatkan hasil bahwa perencanaan fondasi tiang pancang beton pracetak dengan diameter 40 cm dan kedalaman tiang 16 m, menggunakan data yang didapat dari hasil test laboratorium dengan parameter tanah: ϕ, c, dan γ pada kondisi tak terdrainase, didapatkan daya dukung izin sebesar 742,28 kN. Daya dukung izin dari hasil pengujian SPT didapatkan sebesar 609,816 kN. Biaya yang dibutuhkan dalam pembangunan fondasi tiang pancang beton pracetak adalah Rp 4.750.140.000 dengan jumlah tiang pancanag 330 buah. Sedangkan pada tiang bor dengan diameter tiang 80 cm dan kedalaman 13,25 m didapatkan daya dukung izin sebesar 1884,00 kN. Biaya yang dibutuhkan sebesar Rp 6.350.000.000 dengan jumlah tiang bor 157 buah. Hasil tersebut menunjukan dari segi biaya tiang pancang beton pracetak lebih efisien dan ekonomis dibandingkan tiang bor.

2.2 Fondasi Tiang

Fondasi tiang adalah elemen struktur yang berfungsi untuk meneruskan beban ke tanah, baik itu merupakan beban arah *vertical* maupun beban arah *horizontal.* Fondasi tiang juga digunakan bila posisi lapisan tanah keras berada di kondisi yang sangat dalam. Fondasi tiang juga digunakan untuk menahan gaya angkat (*up-lift force*), khususnya pada bangunan-bangunan tingkat tinggi yang dipengaruhi oleh gaya-gaya penggulingan akibat angin. Selain itu, fondasi tiang juga digunakan untuk memperkaku tanah dibawah fondasi mesin, dimana fondasi tiang dapat mengurangi *amplitude* getaran dan frekuensi alamiah dari sistem.

Adapun menurut Hardiyatmo (2010) fondasi tiang digunakan untuk beberapa maksud, adapun maksud itu 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 meng-angker 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 fondasi bangunan yang permukaan tanahnya mudah tergerus air.

Berdasarkan kategori yang ada, maka fondasi tiang dibagi menjadi kategori sebagai berikut (Hardiyatmo 2010):

1. Tiang perpindahan besar (*large displacement pile*)

   Tiang perpindahan besar 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).

2. Tiang perpindahan kecil (*small displacement pile*)

Tiang perpindahan kecil adalah sama seperti 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.

3. Tiang tanpa perpindahan (*non displacement pile*)

Tiang tanpa perpindahan 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 diletakan dalam lubang dan dicor beton).

Berdasarkan metode pelaksanaanya maka tiang dapat di klasifikasikan sebagai berikut (Hardiyatmo, 2010):

1. Tiang pancang (*driven pile*)
   Tiang dipasang dengan cara membuat bahan berbentuk bulat atau bujursangkar memanjang yang dicetak lebih dulu dan kemudian dipancang atau ditekan ke dalam tanah.
2. Tiang bor (drilled shaft)
   Tiang dipasang dengan cara mengebor tanah terlebih dulu sampai kedalaman tertentu, kemudian tulangan baja dimasukan dalam lubang bor dan kemudian diisi/dicor dengan beton.
3. Kaison (*caisson*)
   Suatu bentuk kotak atau silinder telah dicetak lebih dulu, dimasukan ke dalam tanah, pada kedalaman tertentu, dan kemudian diisi beton. Kadang-kadang kaison juga disebut sebagai tiang bor yang berdiameter/lebih besar, sehingga kadang-kadang mebingungkan dalam penyebutannya.

2.2.1 Jenis – Jenis Fondasi Tiang

Fondasi tiang memiliki beberapa klasifikasi, berdasarkan jenis bahan tiang dan pembuatannya tiang pancang dan tiang bor dapat dibedakan menjadi:

2.2.1.1 Fondasi Tiang kayu

Fondasi tiang kayu merupakan cara tertua dalam penggunaan tiang pancang sebagi Fondasi. Tiang pancang kayu terbuat dari batang pohon yang cabang–cabang nya telah dipotong dengan hati-hati dan biasanya diberi bahan pengawet dan di dorong dengan ujungnya yang kecil sebagai bahan yang runcing, umumnya berdiameter antara 10 – 25 cm. Tiang kayu yang banyak dipakai di Indonesia adalah cerucuk yang dipakai untuk perbaikan kapasitas dukung tanah lunak berdiameter antara 8 – 10 cm dan panjang 4 m. Tiang pancang kayu akan tahan lama dan tidak mudah busuk apabila tiang kayu tersebut dalam keadaan selalu terendam penuh dibawah permukaan air tanah.

Gambar 2.1 Tiang pancang kayu

(Sumber:http://artthuresoninc.com/Gallery/tabid/69/galleryType/SlideShow/ItemID/127/Default.aspx)

Fondasi tiang kayu lebih cocok digunakan sebagai tiang gesekan. Umumnya jenis tiang ini meengalami kerusakan rigan saat dilakukan nya pemancangan. Untuk mengantisipasi kerusakan pada saat pemancangan fondasi tiang kayu dapat ditempuh dengann beberapa cara berikut :

- Menggunakan palu ringan
- Pada ujung tiang diberi gelang baja
- Sebelum pemancangan dilakukan pemboran (*pre-drilling*)

Kelemahan dari fondasi tiang kayu adalah bahan organik yang mana dapat lapuk akibat serangga, binatang, jamur, maupun zat-zat kimia. Sehingga tiang kayu membutuhkan perlakuan khusus. Dikarenakan panjangnya terbatas dan diameternya kecil, maka fondasi tiang kayu ini lebih cocok untuk beban ringan dan konstruksi sementara. Beban maksimu yang dapat dipikul oleh fondasi tiang kayu ini dalam 270 kN- 300 kN.

2.2.1.2 Fondasi Tiang Baja

Fondasi tiang baja merupakan tipe tiang pancang dengan material baja, yang cocok digunakan pada fondasi bangunan permanen atauapun sementara. Fondasi tiang baja ini juga ringan, kuat, dan mampu menahan beban yang berat dan penyambungan tiang dilakukan dengan sangat mudah dengan dilakukannya las. Umumnya fondasi tiang baja berbentuk pipa atau profil H dan dapat dipancang dengan bagian ujung tertutup maupun terbuka.

Gambar 2.2 Tiang pancang baja pipa ujung terbuka

(Sumber: https://artikel.rumah123.com/penjelasan-lengkap-pondasi-tiang-pancang-beserta-jenis-keunggulan-dan-kelemahannya-64629)

Tiang baja profil H digunakan untuk penetrasi ke dalam tanah berbatu, jenis ini tidak banyak mendesak volume tanah sehingga tidak menyebabkan penyembulan. Untuk tiang baja pipa dapat dipancang dengan bagian ujung tertutup maupun terbuka. Tiang baja pipi memiliki inersia yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan tiang profil H, sehingga tiang pipa lebih menguntungkan untuk memikul beban lateral yang besar.

Tiang baja lainnya yang dapat digunakan untuk memikul beban yang ringan adalah *screw pile*. Pengerjaan *screw pile* ini dilakukan dengan cara menusuk dan

memutar tiang tersebut ke dalam tanah. Keunggulan dari *scew pile* ini adalah dapat digunakan menahan tarik (*tension piles*). Tiang baja memilki kelemahan terhadap air dan asam, dimana air dan asa, dapat menyebabkan korosi terhadap baja.

2.2.1.3 Fondasi Tiang Beton Pracetak

Fondasi tiang beton pracetak adalah tiang yang terbuat dari beton yang sudah dicetak di suatu tempat dan kemudian diangkut ke lokasi pekerjaan bangunan. Umumnya bentuk penampang jenis fondasi ini adalah berbentuk lingkaran, bujursangkar, segitiga dan oktagonal. Agar mampu menahan gaya dan momen lentur pada tiang yang timbul saat pengangkatan, mampu menahan tegangan yang timbul saat pemancangan, dan beban rencana yang harus dipikul, maka fondasi tiang beton pracetak harus direncanakan dengan baik.

Gambar 2.3 Tiang beton pracetak

(Sumber: https://www.hargajayamix.com/2020/05/Harga-Tiang-Pancang-Murah-KW-SNI.html)

Untuk tiang beton pracetak yang tidak berlubang biasanya menggunakan diameter berukuran diantara 20 sampai 60 cm. Sementara itu untuk tiang beton pracetak yang berlubang biasanya diameter yang digunakan mencapai 140 cm. Tiang beton pracetak memiliki panjang berkisar 20 sampai 60 m.

Adapun keuntungan dari pemakaian tiang pancang pracetak (Hardiyatmo,2010) adalah:

1. Bahan tiang dapat diperiksa sebelum pemancangan.

2. Prosedur pelaksanaan tidak dipengaruhi oleh air tanah.

3. Tiang pancang beton pracetak dapat dipancang sampai kedalaman yang dalam.

4. Pemancagan tiang yang dilakukan menambah kepadatan tanah granuler.

Adapun kerugian dari tiang pancang pracetak (Hardiyatmo,2010) adalah:

1. Pengembungan permukaan tanah dan gangguan tanah akibat pemancangan dapat menimbulkan masalah.
2. Kepala tiang terkadang pecah akibat pemancangan yang terjadi.
3. Bila diameter tiang terlalu besar maka akan sulit dilakukan pemancangan.
4. Pemancangan tiang pancang pracetak menimbulkan gangguan suara, getaran dan deformasi tanah yang dapat mengakibatkan kerusakan bangunan yang ada disekitar pekerjaan.
5. Banyak tulang dipengaruhi oleh tegangan yang terjadi pada saat pengangkutan dan pemancangan tiang.

2.2.1.4 Fondasi *Prestressed Spun Pile*

Fondasi *Prestressed spun pile* merupakan salah satu jenis tiang pancang beton prategang (*prestressed*) yang berbentuk bulat dengan rongga pada bagian dalamnya. Tiang pancang bulat (*prestressed spun pile*) adalah tiang pancang paling modern. Dibuat dengan menggunakan proses *spinning* menciptakan tiang pancang bulat yang memilki kepadatan dan homogenitas.

Gambar 2.4 *Spun pile*

(Sumber: https://www.jayasentrikon.com/pc-spun-pile/)

Fondasi *prestressed spun pile* memiliki kekuatan yang tinggi sehingga dapat memperkecil kemungkinan kerusakan saat dilakukan nya proses pengangkatan dan pemancangan. Tiang jenis ini sangat cocok untuk kondisi dimana dibutuhkan tiang

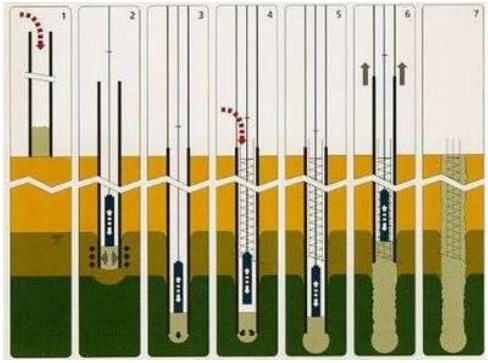
yang panjang dan memiliki daya dukung yang tinggi (Rahardjo,2013). Untuk menghemat berat tiang, bagian tengah tiang dapat dibuat berlubang.

Fondasi *prestressed spun pile* memiliki keuntungan dan kerugian dalam pemakaiannya, adapun keuntungan dari pemakaian fondasi *prestressed spun pile* adalah sebagai berikut:

1. Memiliki kekuatan dan kualitas yang tinggi akibat proses *spinning* yang mengakibatkan hoogenitas dan kepadatan *concrete*.
2. Dikarenakan proses *spinning* yang dilakukan membuat fondasi *prestressed spun pile* memiliki kepadatan sehingga lebih tahan lama dan terlindung daru korosi besi yang terdapat didalamnya.
3. Lebih ekonomis jika dibandingkan dengan tiang pancang jenis lain yang memiliki *bearing area* yang sama.
4. Bentuk tiang pancang yang berupa silinder mempermudah pada saat pekerjaan pemancangan dilakukan.
5. Lebih menghemat biaya transportasi terutama untuk proyek luar pulau ataupun yang berlokasi jauh dikarenakan lebih ringan.

2.2.1.5 Fondasi Tiang Beton Cetak Ditempat

Tiang pancang beton cetak ditempat merupakan salah satu jenis fondasi tiang pancang dari beton yang pengerjaannya dilakukan dengan melakukan cor ditempat pengerjaan (*cast in place pile*) dengan bagian ujung bawah yang diperbesar sehingga daya dukung tiang semakin besar.



Gambar 2.5 *Franki Pile*

(Sumber: https://slideplayer.info/slide/3076060/)

Tiang beton cetak ditempat terdiri dari 2 tipe (Hardiyatmo,2010), adapun 2 tipe tersebut adalah:

1. Tiang yang berselubung pipa

2. Tiang yang tidak berselubung pipa

Untuk tipe tiang yang berselubung pipa, pipa baja dipancang lebih dalam ke dalam tanah yang kemudian adukan cor beton akan dimasukan. Selanjutnya pipa baja akan tetap tinggal di dalam tanah. Yang termasuk kedalam tiang ini adalah tiang *Standar raimond*. Untuk tipe tiang yang tidak terselubung pipa, pengerjaan dilakukan dengan memancang pipa baja berlubang ke dalam tanah yang selanjutnya cor beton akan dimasukan ke dalam tanah lubangnya dan kemudia pipa ditarik keluar ketika atau sesudah pengecoran. Yang termasuk kedalam tiang jenis ini adalah tiang *Franke*.

Terdapat beberapa keuntungan dalam menggunakan tiang *Franki* (Hardiyatmo,2010), adapun keuntungan nya antara lain:

1. Tidak dipengaruhi oleh air tanah dikarenakan tiang pancang tidak dapat dipancang dengan ujung yang tertutup.
2. Panjang tiang tidak dapat disesuaikan dengan kondisi tanah.
3. Bisa dilakukannya pembesaran ujung tiang, sehingga menambah kapasitas dukung tiang.
4. Pekerjaan penulangan tidak dipengaruhi oleh masalah pengangkutan atau tegangan yang timbul akibat pemancangan.

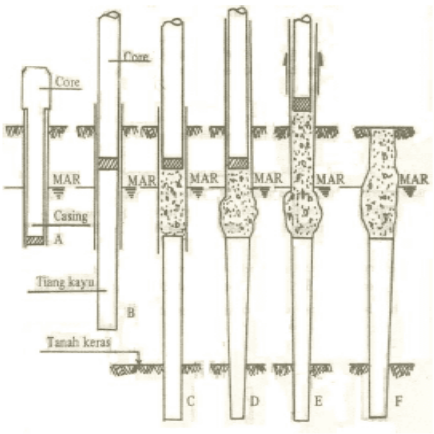
Selain keuntungan dalam menggunakan *Franki pile* terdapat juga beberapa kerugian dalam menggunakan *Franki pile* (Hardiyatmo,2010), adapun kerugiannya antara lain:

1. Gangguan pada tanah dapat mengakibatkan rekonsolidasi dan menimbulkan gaya gesek dinding negatif pada tiang, sehingga mengakibatkan pengurangan kapasitas dukungnya.

2. Akibat pengaruh air pada penarikan pipa selubung dapat mengakibatkan pengurangan mutu beton dan mutu beton tidak dapat diketahui setelah selesai pelaksanaan.
3. Panjang tiang terbatas oleh gaya tarik maksimum yang dapat dilakukan pada saat menarik pipa selubung.
4. Akibat pekerjaan pemancangan dapat menimbulkan suara keras dan getaran yang timbul serta deformasi tanah dapat membahayakan bangunan disekitarnya.
5. Tiang tidak dapat dipancang drngan diameter yang besar.
6. Akibat kenaikan permukaan tanah karena pemancangan dapat merugikan bangunan disekitarnya.

2.2.1.6 Fondasi Tiang Komposit

Fondasi tiang pancang komposit merupakan jenis fondasi tiang pancang yang memadukan berbagai macam jenis bahan lain seperti beton, kayu maupun baja. Rahardjo (2013) menyebutkan bahwa fondasi tiang komposit adalah gabungan antara dua material yang berbeda, misalkan perpaduan antara baja dan beton ataupun material kayu dan beton.



Gambar 2.6 Tiang komposit kayu dengan beton

(Sumber: http://darkspecialistd.blogspot.com/2019/09/jenis-tiang-pancang.html)

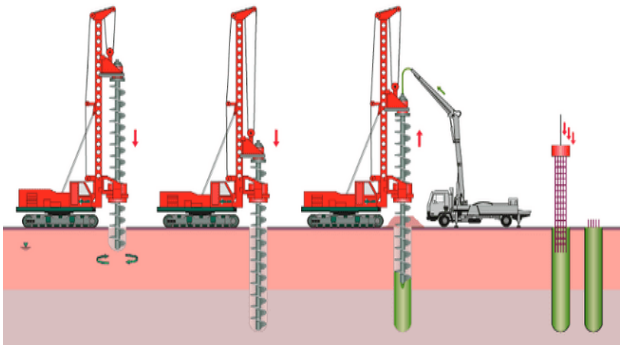
Tiang komposit bisa berupa segmen-segmen yang saling tersambung dan bisa juga berupa material beton yang dicor dalam pipa baja. Terdapat permasalahan

sambungan segmen, yaitu pada ikatan antara kedua material, terutama pada material kayu dan beton. Pada ikatan antara material baja dan beton cukup baik. Beton jenis ini kurang populer jika dibandingkan dengan jenis tiang pancang lainnya seperti tiang pancang baja, kayu dan beton. Teknik pemasangan tiang pancang komposit ini juga rumit dan membutuhkan biaya yang tinggi sehingga jenis fondasi ini mulai ditinggalkan.

2.2.1.7 Fondasi Tiang Bor

Fondasi tiang bor (*bored pile*) adalah salah satu jenis fondasi dalam yang diapasang ke dalam tanah dengan cara mengebor tanah terlebih dahulu dan kemudian diisi tulangan dan di cor beton. Fondasi tiang bor bisa dipakai untuk beban ringan maupun untuk struktur berat seperti bangunan bertingkat tinggi dan jembatan. Tiang bor semakin luas penggunaanya (Rahardjo,2013) antara lain:

- Fondasi Menara tinggi
- Fondasi jembatan
- Fondasi bangunan ringan pada tanah lunak
- *Soldier pile* atau barisan tiang yang berguna untuk peningkatan stabilitas lereng atau digunakan sebagai dinding penahan tanah.
- Fondasi bangunan tinggi atau struktur yang membutuhkan gaya lateral yang besar dan lainnya.



Gambar 2.7 Fondasi tiang bor

(Sumber: https://www.arsitur.com/2017/10/pengertian-pondasi-bored-pile-dan.html)

Pelaksanaan fondasi tiang bor mempunyai karakter khusus dibandingkan tiang pancang dikarenakan cara pelaksanaanya dapat mengakibatkan perbedaan perilaku dibawah pembebanan. Adapun hal-hal yang menjadi akibat perbedaan tersebut (Rahardjo,2013) yaitu:

1. Pelaksanaan tiang bor dilakukan dengan menggali lubang bor dan selanjutnya di isi dengan material cor beton, sedangkan pekerjaan tiang pancang dilakukan dengan memasukan tiang pancang ke tanah dengan mendesak tanah disekitarnya (*displacement pile*).
2. Beton di cor pada saat keadaan basah dan mengalami curing di bawah tanah.
3. Kadang-kadang menggunakan casing untuk untuk menjaga stabilitas dinding lubang bor dan casing tersebut dapat pula tidak dicabut karena kesulitan yang ada di lapangan.
4. Tiang bor biasanya menggunakan *slurry* untuk menjaga stabilitas lubang bor yang dapat membentuk lapisan lumpur pada dinding galian serta mempengaruhi mekanisme gesekan tiang dengan tanah.
5. Penggalian lubang bor disesuaikan dengan kondisi tanah.

Fondasi tiang bor memiliki keuntungan dan kekurangan dalam pemakaian nya adapun keuntungan pemakaian fondasi tiang bor (Rahardjo,2013) antara lain:

1. Metode desain yang semakin handal, berbagai metode desain yang rasional telah dikembangkan untuk berbagai macam pembebanan dan kondisi tanah.
2. Kepastian dalam penentuan kedalaman elevasi ujung fondasi atau lapisan pendukung. Pada fondasi tiang bor penentuan lokasi yang pasti dari penggalian dapat diinspeksi atau diukur, sedangkan pada fondasi tiang pancang lokasi dapat menyimpang dari lokasinya akibat adanya lapisan batuan, batu besar, ataupun faktor lainnya.
3. Inspeksi tanah hasil pemboran. Keandalan dari desain fondasi hanya baik bila kondisi tanah diketahui. Pada fondasi tiang bor, saat pekerjaan penggalian atau pengeboran dapat dilakukan pemeriksaan mengenai jenis untuk dibandingkan dengan jenis tanah yang digunakan pada perencanaan.
4. Fondasi tiang bor dapat dikonstruksi pada hampir semua jenis tanah. Penetrasi dapat dilakukan pada tanah kerikil dan breksi, juga dapat menembus batuan.

5. Umumnya daya dukung yang sangat tinggi memungkinkan perencanaan satu kolom dengan dukungan satu tiang (*one column one pile*) sehingga dapat menghemat kebutuhan pile cap.
6. Bagian atas tiang dapat diperbesar bila diperlukan, misalnya untuk meningkatkan inersia terhadap momen.
7. Ujung bawah tiang dapat diperbesar bila diperlukan, misalnya untuk meningkatkan daya dukung ujung tiang, baik dalam pembebanan tekan maupun tarik.
8. Tidak ada resiko *heaving* (penyembulan).

Adapun kekurangan dalam pemakaian fondasi tiang bor menurut Rahardjo (2013) adalah sebagai berikut:

1. Keterampilan dan kemampuan dari kontraktor sangant berpengaruh terhadap sukses nya pelaksanaan konstruksi tiang bor, pelaksanaan yang buruk dapat menyebabkan penurunan daya dukung yang signifikan.
2. Pengecoran tiang bor dipengaruhi kondisi cuaca.
3. Akibat proses pengeboran kondisi tanah di kaki tang seringkali rusak, terjadi tumpukan tanah dari reruntuhan dinding tiang bor atau sedimentasi lumpur, sehingga seringkali daya dukung ujung dari tiang bor tidak dapat diandalkan.
4. Pengecoran beton akan sulit bila dipengaruhi air tanah dikarenakan mutu beton tidak dapat dikontrol dengan baik.
5. Mutu beton hasil pengecoran jika tidak terjamin kesegaramannya disepanjang badan tiang bor mengurangi kapasitas dukung tiang bor, terutama jika tiang bor berada cukup dalam.
6. Akibat pengeboran menyebabkan gangguan kepadatan, jika tanah berupa pasir atau tanah yang berkerikil.
7. Air yang mengalir ke dalam lubang bor bisa mengakibatkan gangguan pada tanah, sehingga mengurangi kapasitas dukung tiang.

2.2.2 Pertimbangan pemilihan Jenis Fondasi Tiang

Dalam pemilihan jenis fondasi tiang yang akan digunakan ada banyak faktor yang menjadi pertimbangan sehingga fondasi yang dipilih dan digunakan akan sesuai dengan kebutuhan. Menurut Rahardjo (2013) pemilihan jenis fondasi tiang

harus didasarkan pada kondisi pelapisan tanah setempat, sifat dan tingkat kepentingan struktur, pola dan besarnya beban, serta kelayakan teknis maupun ekonominya. Pemilihan akhir jenis fondasi tiang haruslah sudah melewati uji kelayakan teknis dan memperhatikan faktor biaya, faktor keamanan (*safety factor*), kehandalan (*reliability*), kemudahan konstruksi (*constructability*) dan faktor ketahanan fondasi di dalam tanah.

Ada beberapa pertimbangan dalam hal memilih jenis fondasi tiang yang akan digunakan. Adapun pertimbangan yang diperhatikan menurut Rahardjo (2013) yaitu :

1. Terdapat berbagai alternatif jensi fondasi tiang yang dapat digunakan, diantaranya adalah penggunaan fondasi tiang kayu, baja atau beton, dengan cara instalasi yang bermacam-macam, baik dengan dipancang menggunakan palu, dengan getaran, dengan penekanan secara hidrolis maupun dengan *predrilling*. Selain itu dapat juga digunakan fondasi tiang bor, caisson maupun sumuran.
2. Daya dukung tiang adalah faktor terpenting dalam perencanaan fondasi tiang. Dalam menentukan daya dukung tiang, penting untuk memperhatikan jarak antar tiang karena suatu bangunan umumnya memiliki keterbatasan luas lahan, sedangkan jarak antar tiang yang terlalu dekat kan menimbulkan interaksi antar tiang yang dapat mengurangi kapasitasnya.
3. Pengaruh kondisi tanah secara langsung adalah terhadap kemudahan pelaksanaan fondasi tiang. Bilamana hasil penyelidikan geoteknik mengindikasikan bahwa tiang kayu tidak akan mengalami kerusakan pada saat pemancangan, jenis tiang kayu dapat dipakai. Bilamana didapati adanya kerikil atau boulder di dalam tanah atau pemancangan melalui tanah keras, penggunanaan sepatu baja dapat dipertimbangkan. Pada lapisan tanah pasir, lanau atau lempung, dimana kerikil dan batuan tidak dijumpai, dapat dipertimbangkan penggunaan tiang pancang beton. Adanya lensa pasir, lapisan yang berkerikil atau lapisan batuan mungkin tidak akan dapat ditembus oleh tiang pancang, sehingga penggunaan tiang bor dapat dipertimbangkan.
4. Lapisan pendukung dapat dipilih dari kajian mengenai profil dan karakteristik tanah. Dengan memperkirakan kedalaman lapisan tanah pendukung (*bearing layer*), maka kedalaman pemancangan tiang dapat diperkirakan. Jika lapisan

pendukung terlalu dalam, maka penggunaan fondasi tiang gesek dapat dipertimbangkan.

5. Bilamana fondasi tiang harus dipancang atau dikonstruksi pada tanah lempung sebagai dasarnya, maka jenis fondasi yang harus dipilih harus dikaji jenis dan panjangnya untuk memastikan bahwa penurunan yang terjadi masih berada dalam batas-batas toleransi. Bila sitem fondasi yang digunakan amat lebar, maka semakin jauh jarak tiang akan memberikan keuntungan, dimana penurunan yang terjadi akan semakin kecil jika dibandingkan dengan penggunaan tiang pendek dalam jumlah yang lebih banyak dan jarak yang makin dekat.
6. Fondasi tiang tidak boleh mengalami degredasi selama umur bangunan struktur. Disamping itu, kapasitas beban yang dapat dipikul oleh tiang juga tidak boleh menurun misalnya karena perubahan sifat dari tanah atau batuan, atau adanya konstruksi baru (misalnya galian disekitarnya) kinerja tiang juga dapat diartikan sebagai besarnya penurunan dan pergerakan lateral akibat dari pembebanan.
7. Tiang yang akan digunakan harus tersedia dalam panjang dan kualitas yang dibutuhkan agar tidak menghambat kemajuan pelaksanaan konstruksi.
8. Biaya fondasi tiang merupakan salah satu faktor penentu dalam pemilihan jenis fondasi tiang. Untuk membandingkan biaya fondasi tiang, dapat digunakan pendekatan berupa besarnya biaya tersebut per meter panjang tiang dan harganya per ton daya dukung yang ditawarkan fondasi tiang tersebut (*unit capacity cost*). Dalam perhitungan biaya ini besarnya biaya untuk *pile cap* dan hal-hal lain yang berkaitan dengan pekerjaan fondasi perlu dipertimbangkan.

Khusus untuk bangunan gedung, ada hal khusus yang menjadi pertimbangan dalam memilih fondasi tiang, adapun pertimbangan untuk fondasi tiang gedung adalah :

1. Bila bangunan gedung ada pada tanah lunak, fondasi tiang memiliki daya dukung lateral yang rendah dan memungkinkan jumlah tiang akan lebih ditentukan oleh kapasitas lateral dibanding kapasitas aksial.
2. Kompresi atau penurunan pada tanah lunak akibat beban yang bekerja perlu dipertimbangkan jika di bawah lapisan pendukung didapati tanah lunak dan fondasi tiang duduk di atas lapisan pendukung.

2.2.3 Tiang Dukung Ujung dan Tiang Gesek

Tiang ditinjau dari cara mendukung beban maka tiang dapat dibagi menjadi 2 macam (Hardiyatmo,2010), yaitu:

1. Tiang dukung ujung (*end bearing pile*)

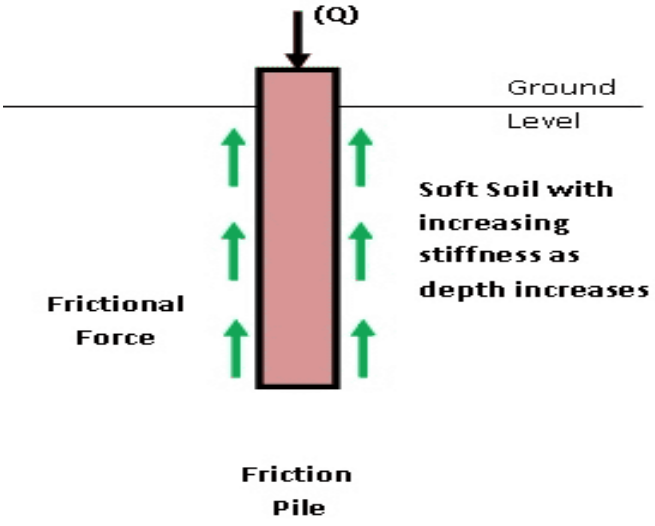
Gambar 2.8 Tiang dukung ujung (*end bearing pile*)

(Sumber:https://www.prodyogi.com/2021/01/end-bearing-pile-features-advantages.html)

Tiang dukung ujung (*end bearing pile*) merupakan suatu tiang yang daya dukungnya lebih ditentukan oleh tahanan ujung tiang. Pada umumnya suatu tiang dukung ujung berada di dalam zona tanah lunak yang didasari oleh tanah keras. Untuk dapat mendukung beban yang diperkirakan dan menghindari penurunan yang berlebihan, maka tiang-tiang dipancang hingga mencapai batuan dasar atau lapisan keras. Daya dukung tiang akan sepenuhnya ditentukan dari tahanan dukung lapisan keras yang berada di bawah ujung tiang.

2. Tiang gesek (*friction pile*)

Tiang gesek (*friction pile*) merupakan tiang yang daya dukung nya akan lebih ditentukan berdasarkan perlawanan gesek antara sisi tiang dan tanah yang ada di sekitarnya. Tahanan gesek beserta pengaruh konsolidasi lapisan tanah yang ada di bawahnya akan diperhitungkan pada perhitungan daya dukung tiang.



Gambar 2.9 Tiang gesek (*friction pile*)

(Sumber: https://theconstructor.org/geotechnical/pile-foundation-selection-based-soil-conditions/9461/)

2.2.4 Penentuan Daya Dukung Izin Dan Faktor Keamanan

Daya dukung izin fondasi tiang untuk beban aksial, Q_a atau $Q_{all,}$ dengan suatu faktor keamanan (SF) baik secara keseluruhan ataupun secara terpisah dengan menerapkan faktor keamanan (SF) pada daya dukung selimut dan pada tahanan ujungnya. Oleh sebab itu, maka daya dukung ijin tiang dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_{all} = \frac{Qu}{SF} \quad \text{.....(2.1)}$$

Atau

$$Q_{all} = \frac{Qp}{SFujung} + \frac{Qs}{SFselimut} \quad \text{.....(2.2)}$$

Keterangan:

Qa = Daya dukung izin tiang.

Qp = Daya dukung ultimit ujung tiang.

Qs = Daya dukung ultimit selimut tiang.

SF_{ujung} = Faktor keamanan pada ujung tiang.

$SF_{selimut}$ = Faktor keamanan pada selimut tiang.

Ada beberapa faktor penentu faktor keamanan (Rahardjo,2013), adapun faktor tersebut antara lain:

1. Jenis dan kepentingan struktur
2. Variasi kondisi tanah
3. Tingkat kehandalan penyelidikan geoteknik
4. Jumlah dan jenis pengujian geoteknik
5. Ketersediaan data uji pembebanan di dekat lokasi
6. Tingkat pengawasasn dan pengendalian mutu pekerjaan fondasi
7. Probabilitas rencana yang akan terjadi sepanjang masa bangunan

SNI 8460:2017 pasal 9.2.3.1 mengenai Persyaratan Perancangan Geoteknik menyatakan bahwa "daya dukung izin fondasi diperoleh dari daya dukung ultimit fondasi tersebut dibagi dengan suatu faktor keamanan yang besanya minimum 3 untuk fondasi dangkal atau minimum 2,5 untuk fondasi dalam."

2.3 Daya Dukung Fondasi Tiang Pancang

Daya dukung tiang pancang merupakan kapasitas tiang dalam mendukung beban (Hardiyatmo,2010). Bila dalam daya dukung fondasi dangkal menggunakan satuan tekanan (kPa) maka dalam daya dukung tiang satuannya merupakan satuan gaya (kN). Pada beberapa literatur yang ada digunakan istilah *pile capacity* atau *pile carrying capacity*.

Perhitungan daya dukung tiang dapat dilakukan dengan pendekatan statis dan dinamis. Perhitungan daya dukung tiang dengan cara statis dilakukan dengan mengacu pada teori mekanika tanah, yaitu dengan cara mempelajari sifat-sifat teknis tanah, sedangkan perhitungan dengan cara dinamis dilakukan dengan cara menganalisa kapasitas ultimit dengan data yang diperoleh dari data pemancangan tiang.

2.3.1 Daya Dukung Tiang Pancang Dari Uji Penetrasi Standar (SPT)

Penentuan daya dukung fondasi tiang pancang dengan menggunakan data SPT dilakukan dengan metode analitis antara lain metode Briaud et al (1985) dan Brown (2001) serta membandingkan dengan metode yang biasa digunakan yaitu Meyerhof (1976).

2.3.1.1 Metode Meyerhof (1976)

Meyerhof (1976) menganjurkan formula daya dukung untuk tiang pancang sebagai berikut :

$Qu = 40\ Nb\ .\ Ap + 0{,}2\ N\ .\ As$……...……...(2.3)

Dimana :

Qu = daya dukung ultimit fondasi tiang pancang (ton)

Nb = harga N-SPT pada elevasi dasar tiang

Ap = luas penampang dasar tiang (m^2)

As = luas selimut tiang (m^2)

N = harga N-SPT rata-rata

Untuk tiang dengan desakan tanah yang kecil seperti tiang bor dan tiang baja H, maka daya dukung selimut hanya diambil separuh dari formula diatas menjadi :

$Qult = 40\ Nb\ .\ Ap + 0{,}1\ N\ .\ As$……...……..……..…..(2.4)

Harga batas untuk Nb adalah 40 dan harga batas untuk 0,2 N adalah 10 ton/m^2.

Mayerhof (1976) memberikan persamaan untuk menghitung tahanan ujung tiang sebagai berikut:

$q_p = 0{,}4\ .\ p_a\ .\ N_{60}\ .\ \frac{L}{D} \leq 4\ .\ p_a\ .\ N_{60}$……..……..……(2.5)

Dimana :

N60 = rata-rata NSPT pada kedalaman 10D diatas dan 4D dibawah ujung tiang

Pa = tekanan atmosfer (100 kN/m^2 atau 2000 lb/ft^2)

Mayerhof (1976) menyatakan bahwa nilai N yang digunakan pada tanah pasir dalam persamaan 2.6 di atas merupakan nilai N yang telah dikoreksi terhadap tegangan vertikal efektif. Untuk unit tahanan ujung q_p (kPa) tiang pancang pada tanah pasir dan gravel yang dibawahnya ada lapisan yang lunak, Mayerhof (1976) merekomendasikan persamaan :

$qp = 400\ \overline{N'o} + \frac{(40\ \overline{N'B} - 40\ \overline{N'o})}{b} D_B$……..…….……....(2.6)

qp ≤ 400 $\overline{N'B}$……..……..(2.7)

Dimana :

$\overline{N'o}$ = Nilai rata-rata N_{SPT} yang telah dikoreksi terhadap tegangan vertikal efektif pada lapisan lunak dibawah lapisan pendukung.

$\overline{N'B}$ = Nilai rata-rata N_{SPT} yang telah dikoreksi terhadap tegangan vertikal efektif pada lapisan pendukung.

D_B = Panjang pembenaman tiang pada lapisan pendukung.

b = diameter tiang (m)

Nilai batas 400 $\overline{N'B}$ tercapai ketika panjang pembenaman tiang pada lapisan pendukung mencapai 10 kali diameter tiang.

Panjang tiang yang duduk pada lapisan pasir pendukung homogen, unit tahanan ujung dapat dihitung menggunakan persamaan :

$qp = \frac{(40\ \overline{N'B} - DB)}{b} \leq 400\ \overline{N'B}$……..(2.8)

2.3.1.2 Metode Briaud et al (1985)

Metode Briaud et al (1985) menyarankan sebuah persamaan tahanan ujung satuan sebagai berikut ini (Hardiyatmo,2010) :

$f_b = 1{,}97.\sigma_r.(N_{60}')^{0{,}36}$……...(2.9)

Dan tahanan gesek satuan digunakan persamaan sebagai berikut ini :

$f_s = 0{,}224\ \sigma_r\ .\ (N_{60}')^{0{,}29}$……...(2.10)

Dengan :

f_b = tahanan ujung satuan (kN/m^2)

f_s = tahanan gesek satuan (kN/m^2)

σ_r = Tegangan referensi = 100 kN/m^2

N_{60}' = N-SPT yang dikoreksi terhadap pengaruh prosedur lapangan dan tekanan *overburden.*

Dalam menghitung daya dukung ultimit persamaan yang digunakan adalah sebagai ini :

$$Qu = Ab.fb + As.fs \quad \text{(2.11)}$$

Dengan :

Qu = Daya dukung ultimit

Ab = Luas ujung tiang

As = Luas Selimut tiang

2.3.1.3 Metode Brown (2001)

Untuk menghitung nilai unit tahanan selimut dan ujung tiang metode Brown (2001) menggunakan korelasi empiris dari hasil pengujian SPT (N_{60}). Dasar dari metode brown (2001) ini adalah dari korelasi 71 hasil pengujian statis tiang pada proyek Caltrans di berbagai jenis dan tipe tanah. Tipe tiang yang dilakukan pengujian termasuk tiang pancang pipa (dengan ujung tertutup dan terbuka), tiang baja H dan tiang pancang beton pratekan. Metode Brown (2001) juga mempertimbangkan kondisi pembebanan tekan tarik dan metode instalasi tiang yang menggunakan sistem impak dan vibrasi.

Metode Brown (2001), persamaan unit tahanan selimut tiang yang diusulkan adalah :

$$f_s = f_{vs} (A_b + B_b . N_{60}) \quad \text{(2.12)}$$

N_{60} merupakan nilai N_{spt} yang sudah dikoreksi terhadap efisiensi energi dan F_{vs} merupakan faktor reduksi guna pemancangan tiang dengan cara vibrasi. A_b dan B_b ditentukan dari analisa regresi data-data yang mengacu pada jenis tanah yang ditunjukan pada tabel 2.5

Unit tahanan ujung pada sistem pemancangan menggunakan beban impak bisa dihitung dengan persamaan:

$$q_p = 170 . N_{60} \text{ (kPa)} \quad \text{(2.13)}$$

Jika sistem pemancangan menggunakan sistem vibrasi, maka unit tahanan ujung dari persamaan diatas harus dikali 0.56.

Dalam pemancangan tiang baja H dan pipa ujung terbuka, Metode Brown (2001) merekomendasikan untuk menghitung kapasitas dukung ujung menggunakan persamaan:

$Q_p = q_p (A_t + A_{tp} . F_p)$……(2.14)

Persamaan diatas selain melakukan pertimbangan luas aktual ujung tiang (A_t) pada tiang baja H dan tiang pipa ujung terbuka juga mengakomodasi tahanan tanah yang menempel (*soil plug*) di area ujung tiang. Faktor F_p = 0,42 untuk tiang pipa ujung terbuka atau = 0,67 untuk tiang baja H.

Tabel 2.1 nilai-nilai faktor reduksi untuk metode brown

Kondisi Beban	Metode Instalasi	Jenis Tanah	F_{vs}	A_b kPa	B_b kPa/bpf
Tekan	Impak	Clay to Sand	1.0	26.6	1.92
Tekan	Impak	Gravelly Sand to Boulders	1.0	42.6	42.6
Tekan	Impak	Rock	1.0	138.0	138.0
Tarik	Impak	Clay to Sand	1.0	25.0	1.8
Tarik	Impak	Gravelly Sand to Boulders	1.0	40.0	0.0
Tarik	Impak	Rock	1.0	130	0.0
Tarik	Vibrasi	Clay to Sand	0.68	25.0	1.8
Tarik	Vibrasi	Gravelly Sand to Boulders	0.68	40.0	0.0
Tarik	Vibrasi	Rock	0.68	130.0	0.0

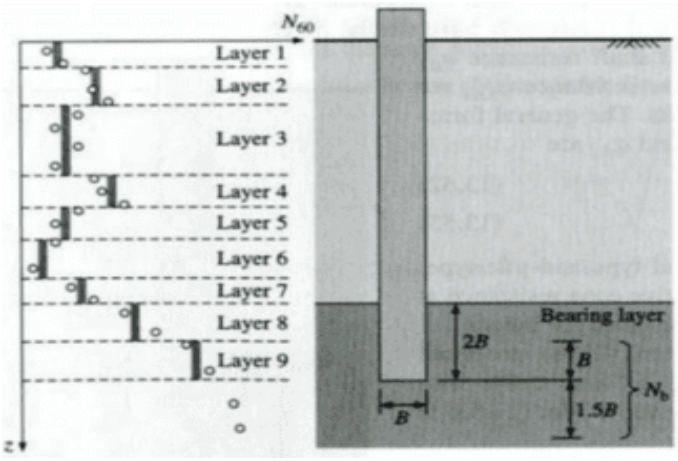
(Sumber: FHWA,2006 dalam Manual Fondasi Tiang 4th ed, Paulus P. Rahardjo, 2013)

2.4 Daya Dukung Fondasi Tiang Bor

Perhitungan daya dukung Fondasi tiang bor menggunakan data sekunder SPT (*Standard Penetration Test*).

2.4.1 Daya Dukung Tiang Bor Berdasarkan Hasil SPT

Profil tanah dibagi menjadi beberapa lapisan berdasarkan hasil SPT (*Standard Penetration Test*) yang dapat dilihat pada Gambar 2.11**.** Lapisan tanah tersebut dibagi menurut tipe tanah yang sama.



Gambar 2.11 Deskritisasi profil tanah berdasarkan nilai SPT

(Sumber: The Engineering of Foundations, Rodrigo Salgado,2008)

Berikut merupakan persamaan dalam menghitung tahanan ujung tiang dan tahanan selimut tiang:

$$\frac{qb}{\text{PA}} = nb\ X\ Nb \quad \text{.....(2.17)}$$

$$\frac{qsi}{PA} = nsi\ X\ Nsi \quad \text{.....(2.18)}$$

Keterangan:

q_b = tahanan ujung tiang (kg/cm^2)

N_b = rata-rata N_{SPT} pada ujung tiang

P_A = tekanan atmosfer (100 kN/m^2)

n_b,n_s = koefisien berdasarkan jenis tanah

q_s = tahanan selimut tiang pada layer ke-i

N_{si} = rata-rata N_{SPT} pada layer ke-i

Tabel 2.2 *Design values* dari $c_b = q_b/q_{cb}$ dan $n_b = q_b/ [P_A (N_b)]$ untuk tiang tanpa perpindahan (*drilled shafts*) dan CFA di pasir

Source	Equation of value	Basic and applicability
Franke (1989)	$c_b = 0,2$	Experience with load test on drilled shafts
Ghionna et al. (1994)	$c_b = 0,13 \pm 0,02$	Database of calibration chamber load test
Salgado (2006a) based on Lee and Salgado (1999)	$c_b = 0,23\exp(-0,0066D_R)$	Finite element analysis verified using calibration chamber tests
Lopes dan Laprovitera (1988)	$n_b = 0,82$ for clean sand $n_b = 0,72$ for sand with silt or clay	Database of noninstrumented pile load tests Ultimit load = limit load estimated by extrapolation using the van der veen criterion
Reese and O'Neill (1989)	$n_b = 1,9$ for CFA piles $n_b = 1,2$ for drilled shafts	CFA piles and drilled shafts Load test and experience Ultimate load criterion not clearly defined

(Sumber: The Engineering of Foundations, Rodrigo Salgado,2008)

Tabel 2.3 Design values dari $n_s = q_s / [P_A(N_S)_{60}]$ untuk tiang di pasir

Source	Equation of value	Basic and applicability
Thorburn and Mc Vicar (1971)	$n_s = 0,2$	
Mayerhof (1976,1983)	$n_s = 0,02$ for full-displacement piles $n_s = 0,01$ for H piles	Experiance
Aoki and Velloso (1975) and Aoki et al. (1978)	$n_s = 0,033$ for *sand* $n_s = 0,038$ for *silty sand* $n_s = 0,040$ for *silty sand with clay* $n_s = 0,033$ for *clayey sand with slit* $n_s = 0,043$ for *clayey sand* Franki piles: multiply number above by 0,7 Drilled shafts: multiply number above by 0,5	Database of noninstrumented pile load tests Applicable to driven piles; for franki piles and drilled shafts, multiply by coefficient provied
Lopes dan Laprovitera (1988)	$n_s = 0.0014$ for *sand* $n_s = 0.0016$ for *silty sand* $n_s = 0.0020$ for *silty sand with clay* $n_s = 0.0024$ for *clayey sand with slit* $n_s = 0.0026$ for *clayey sand*	Database of noninstrumented pile load tests Applicable to nondisplacement piles

(Sumber: The Engineering of Foundations,Rodrigo Salgado,2008)

Tabel 2.4 Design values dari $c_b = q_b/q_{cb}$ dan $n_b = q_b/[P_A (N_b)]$ untuk tiang di tanah lempung

Source	Equation of value	Basic and applicability
State of the art	$c_b = 0.9 - 1$	Soft to lightly overconsolidated clays
Price dan Wardle (1982)	$c_b = 0.35$ for *driven pile* $c_b = 0.30$ for *jacked pile*	Pile load tests and CPTs in London clay stiff clays
Aoki dan Valleso (1975) and Aoki et al (1978)	$n_b = 0.95$ for pure *clay* $n_b = 1.05$ for *silty clay* $n_b = 1.57$ for *silty sand with clay* $n_b = 1.43$ for sandy clay *with silt* $n_b = 1.67$ for *sandy clay* Franki piles: multiply number above by 0,7 Drilled shafts: multiply number above by 0,5	Database of noninstrumented pile load tests Applicable to driven piles; for franki piles and drilled shafts, multiply by coefficient provied Ultimate load = limit load estimated by extrapolation using the Van der Veen criterion
Lopes dan Laprovitera (1998)	$n_b = 0.34$ for *pure clay* dan *silty clay* $n_b = 0.41$ for *silty clay with sand* dan *sandy clay with silt* $n_b = 0.66$ for *sandy clay*	Database of noninstrumented pile load tests Applicable to nondisplacement piles Ultimate load = limit load estimated by extrapolation using the Van der Veen criterion

(Sumber: The Engineering of Foundations,Rodrigo Salgado,2008)

Tabel 2.5 Design Values dari cs = qs/qc dan ns = qs/[PA(Ns)] untuk tiang di tanah lempung

Source	Equation of value	Basic and applicability
Aoki dan Valleso (1975) dan Aoki et al (1978)	$c_s = 0.017$ for *pure clay* $c_s = 0.011$ for *silty clay* $c_s = 0.0086$ for *silty clay with sand* $c_s = 0.0080$ for *sandy clay with slit* $c_s = 0.0069$ for *sandy clay* Franki piles: multiply number above by 0,7 Drilled shafts: multiply number above by 0,5	Database of noninstrumented pile load tests Applicable to driven piles; for franki piles and drilled shafts, multiply by coefficient provied
Lopes dan Laprovitera (1998)	$c_s = 0.012$ for *pure clay* $c_s = 0.011$ for *silty clay* $c_s = 0.010$ for *silty clay with sand* $c_s = 0.0087$ for *sandy clay with slit* $c_s = 0.0069$ for *sandy clay*	Database of noninstrumented pile load tests Applicable to nondisplacement piles

Lanjutan Tabel 2.5

Source	Equation of value	Basic and applicability
Aoki dan Valleso (1975) dan Aoki et al (1978)	$n_s = 0.029$ for *clay* $n_s = 0.021$ for *silty clay* $n_s = 0.024$ for *silty clay with sand* $n_s = 0.020$ for *sandy clay with slit* and *sandy clay* Tiang Franki: dikalikan angka diatas dengan 0,7 Tiang Bor : dikalikan angka diatas dengan 0,5	Database of noninstrumented pile load tests Applicable to driven piles; for franki piles and drilled shafts, multiply by coefficient provied
Lopes dan Laprovitera (1998)	$n_s = 0.0024$ for *clay* $n_s = 0.022$ for *silty clay* $n_s = 0.024$ for *silty clay with sand* $n_s = 0.022$ for *sandy clay with silt* $n_s = 0.031$ for *sandy clay*	Database of noninstrumented pile load tests Applicable to nondisplacement piles

(Sumber:The Engineering of Foundations,Rodrigo Salgado,2008)

2.5 Daya Dukung Kelompok Tiang

Pada fondasi tiang yang memiliki diameter besar atau untuk beban yang ringan sering menggunakan fondasi tiang tunggal untuk memikul beban kolom atau beban struktur, tapi pada umumnya beban kolom struktur atas bisa juga dipikul oleh suatu kelompok tiang.

Dalam penggunaanya kelompok tiang memiliki beberapa keuntungan, adapun keuntungan-keuntungan dalam penggunaan kelompok tiang adalah sebagai berikut:

- Bisa digunakan jika tiang tunggal tidak mempunyai kapasitas yang untuk menahan beban kolom.
- Pemancangan tiang atau instalasi tiang bor bisa meleset (sampai dengan 15 cm) dari posisi semula. Eksentrisitas yang ditumbulkan terhadap pusat beban dari kolom bisa menyebabkan timbulnya momen-momen tambahan. Jika kolom dipikul oleh beberapa fondasi, maka pengaruh eksentrisitas ini bisa berkurang secara signifikan, sehingga sistem kelompok tiang menjadi lebih baik.
- Kegagalan dari sebuah tiang bisa diminimalkan dengan adanya tiang-tiang yang lain (prinsip *redudancy*).

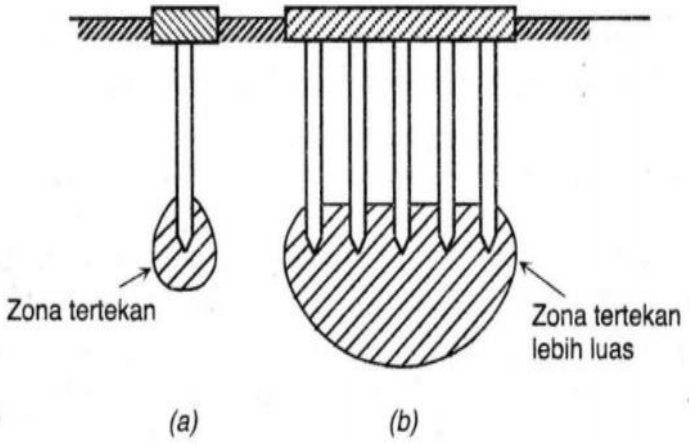
- Menyebabkan terjadinya pemadatan pada arah lateral, khusunya pada pemancangan tiang. Hal ini meningkatkan tekanan tanah lateral yang bekerja pada sekeliling tiang sehingga meningkatkan kapasitas tahanan geseknya. Hal ini khusunya berlaku pada jenis tanah pasiran.

Kapasitas pada kelompok tiang tidak selalu sama dengan jumlah kapasitas tiang tunggal yang berada dalam kelompoknya. Hal ini terjadi bila melakukan pemancangan tiang pada lapisan pendukung yang mudah mampat atau dilakukan pemancangan pada lapisan tanah yang tidak mudah mampat, tetapi di bawahnya terdapat lapisan lunak. Pada kondisi tersebut, stabilitas pada kelompok tiang tergantung dari dua hal, yaitu :

- Daya dukung tanah di sekitar dan di bawah kelompok tiang dalam mendukung beban total struktur.
- Pengaruh penurunan konsolidasi tanah yang terletak dibawah kelompok tiang.

Bila dilakukan pemancangan tiang-tiang pada lapisan yang lumayan kuat tetapi dapat mampat (misalnya lempung kaku), atau dilakukan pemancangan pada lapisan yang tidak mudah mampat (misalnya pasir padat), namun lapisan itu berada di atas lapisan lunak, maka kapasitas kelompok tiang bisa jadi lebih rendah dari jumlah kapasitas masing-masing tiang. Hal ini disebabkan oleh daya dukung ijin fondasi tiang akan dibatasi oleh penurunan toleransi.

Pada beban struktur yang sama penurunan kelompok tiang lebih besar dari penurunan tiang tunggalnya. Hal tersebut dikarenakan pada tiang tunggal luas zona tertekan pada bagian bawah tiang sangat kecil dibandingkan luas zona tertekan untuk kelompok tiang, sehingga penurunan tiang tunggal (gambar 2.12).



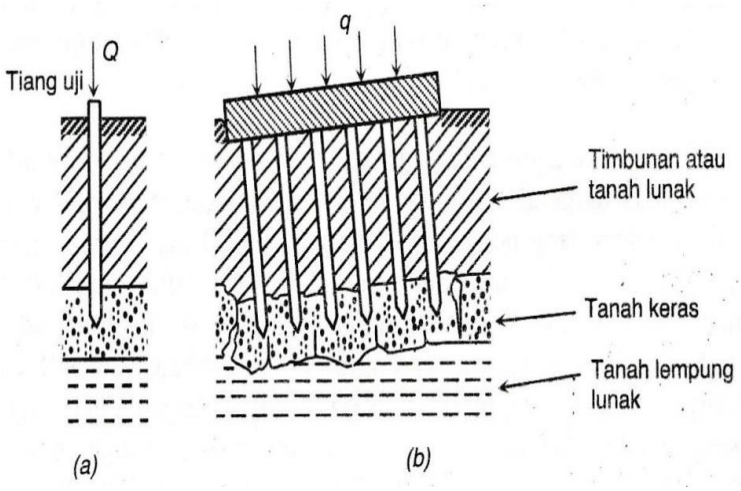
Gambar 2.12 Perbandingan zona tanah tertekan (Tomlinson,1977)

(a) Tiang tunggal

(b) Kelompok tiang

(Sumber: Analisis dan Perancangan Fondasi II, Hary Christady Hardiyatmo, Edisi Kedua, 2011)

Tomlinson (1977) melakukan penjelasan mengenai perbedaan pengaruh tekanan tiang pada tanah pendukung untuk tiang tunggal dan kelompok tiang, seperti pada gambar 2.13. Dalam gambar tersebut dilakukan perbandingan antara sebuah tiang dari kelompok tiang yang dibebani (dalam uji beban tiang) dengan sebuah kelompok tiang saat beban total bangunan sudah bekerja (Gambar 2.12). Tiang-tiang didukung oleh lapisan tanah kuat, yang berada di atas lapisan lunak.



Gambar 2.13 Perbandingan tekanan tiang pada tanah pendukung (Tomlinson,1977)

(a) Uji tiang tunggal. Tekanan ke tanah lunak kecil,

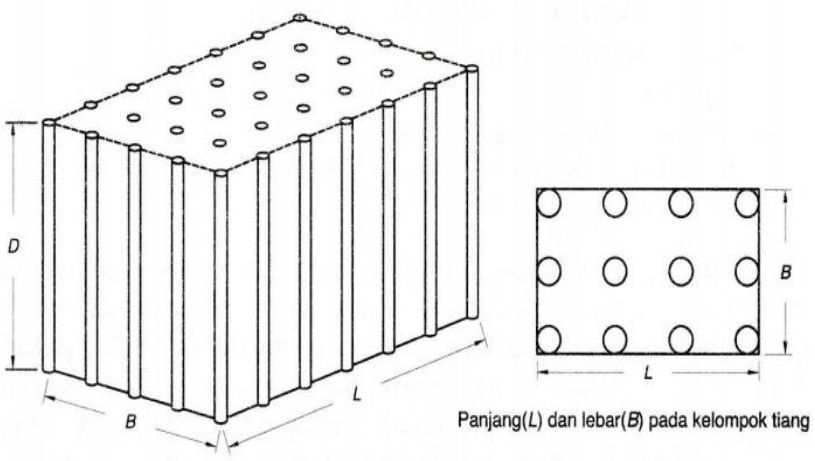
(b) Kelompok tiang. Tekanan pada lapisan tanah lunak sangat besar.

(Sumber: Analisis dan Perancangan Fondasi II, Hary Christady Hardiyatmo, Edisi Kedua, 2011)

Lapisan tanah padat tidak mengalami tekanan yang besar pada tiang tunggal, namun ketika semua tiang pada kelompok tiang di beri beban, zona tertekan berkembang sampai tanah lunak sehingga bisa mengakibatkan penurunan

yang besar atau bisa sampai terjadi keruntuhan bangunan yang didukung oleh kelompok tiang tersebut.

Pada umumnya model keruntuhan blok terjadi jika rasio jarak tiang dibagi diameter ($\frac{s}{d}$) kurang lebih 2. Whitaker (1957) meperlihatkan bahwa keruntuhan blok terjadi pada jarak 1,5d untuk kelompok tiang yang memiliki jumlah 3 x 3, dan kurang dari 2,25d untuk tiang yang memiliki jumlah 9 x 9. Keruntuhan tiang tunggal akan terjadi pada jarak tiang lebih besar.



Gambar 2.14 Kelompok tiang pada tanah lempung yang bekerja sebagai blok.

(sumber: Analisis dan Perancangan Fondasi II, Hary Christady Hardiyatmo, Edisi Kedua, 2011)

2.5.1 Efisiensi Tiang Dalam Tanah Kohesif

Daya dukung tiang gesek (*friction pile*) pada tanah lempung akan mengalami pengurangan bila tiang semakin dekat. Beberapa pengamatan menunjukan jika daya dukung total dari kelompok tiang gesek (*friction pile*), khususnya tiang dalam tanah lempung, sering lebih kecil dibandingkan hasil kali daya dukung tiang tunggal dikalikan dengan jumlah tiang dalam kelompoknya. Maka, besarnya daya dukung total menjadi tereduksi dengan nilai reduksi yang tergantung dari ukuran, bentuk kelompok, jarak, dan panjang tiangnya. Nilai pengali terhadap kapasitas dukung ultimit tiang tunggal dengan memperhatikan pengaruh dari kelompok tiang, disebut dengan efisiensi tiang (E_g).

Coduto (1994), efisiensi tiang (E_g) bergantung pada beberapa faktor, adapun faktor-faktor tersebut antara lain:

1. Jumlah, panjang, diameter, susunan dan jarak tiang.

2. Model transfer beban (tahaan gesek terhadap tahanan dukung ujung).

3. Prosedur pelaksanaan pemasangan tiang.

4. Urutan pemasangan tiang.

5. Macam tanah.

6. Waktu setelah pemasangan tiang.

7. Interaksi antara pelat penutup tiang (pile cap) dengan tanah

8. Arah dari beban yang bekerja.

Beberapa persamaan efisiensi tiang telah diusulkan untuk melakukan perhitungan kapasitas kelompok tiang, tetapi semuanya hanya bersifat pendekatan. Beberapa persamaan yang diusulkan didasarkan pada susunan tiang, jarak relatif dan diameter tiang, dengan tidak memperhitungkan panjang tiang, variasi bentuk tiang yang meruncing, variasi sifat tanah dengan kedalaman dan pengaruh muka air tanah. Dari beberapa persamaan efisiensi tiang yang ada, salah satu yang disarankan oleh *Converse-Labarre formula*, sebagai berikut :

$$E_g = 1 - \theta \frac{(n-1)m+(m-1)n}{90mn} \quad \text{.....(2.19)}$$

Keterangan :

E_g = efisiensi kelompok tiang

m = jumlah baris tiang

n = jumlah tiang dalam satu baris

θ = arc tg d/s, dalam derajat

s = jarak pusat ke pusat tiang (m)

d = diameter tiang (m)

efisiensi kelompok tiang didefinisikan sebagai berikut :

$E_g = \frac{Qg}{nQu}$……(2.20)

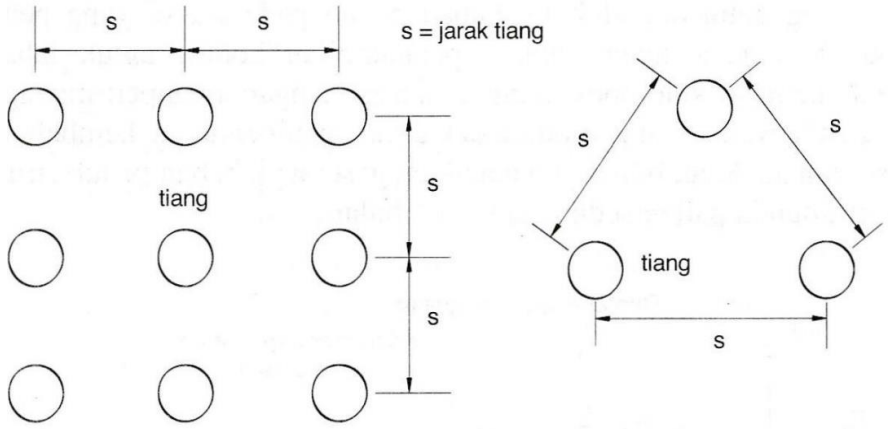
E_g = efisiensi kelompok tiang

Q_g = beban maksimum kelompok tiang yang mengakibatkan keruntuhan

Q_u = beban maksimum tiang tunggal yang mengakibatkan keruntuhan

n = jumlah tiang dalam kelompok

Menurut SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik pasal 9.7.1.2 menyatakan bahwa untuk fondasi tiang jarak as ke as tidak boleh kurang dari keliling dan untuk tiang berbentuk lingkaran tidak boleh kurang dari 2,5 kali diameter tiang.



Gambar 2.15 Defenisi jarak s dalam hitungan efisiensi tiang.

(sumber: Analisis dan Perancangan Fondasi II, Hary Christady Hardiyatmo, Edisi Kedua, 2011)

Kapasitas dukung kelompok tiang berdasarkan SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik pasal 9.7.1.1 dinyatakan berdasarkan persamaan:

$Q_g = E_g \, n \, Q_{all}$……..(2.21)

Dalam beberapa kasus pada tiang-tiang yang terletak pada lempung lunak, daya dukung tiang lebih dipengaruhi oleh pertimbangan penurunan konsolidasi dan penurunan segera (*immediate settlement*) dari kelompok tiangnya. Pada kasus ini,

pengaruh efisiensi kelompok tiang hanya sebagai petunjuk awal untuk mengetahui jumlah tiang yang dibutuhkan pada beban penuh dari suatu struktur.

2.6 Penurunan Kelompok Tiang

Perkiraan penurunan (*settlement*) pada suatu fondasi tiang kelompok merupakan masalah yang kompleks, dikarenakan hal sebagai berikut:

- Gangguan pada keadaan tegangan tanah saat pemancangan
- Ketidakpastian mengenai distribusi dan posisi pengalihan beban (*load transfer*) dari fondasi tiang ke tanah.

Displacement (penurunan) yang diperlukan untutk memobilisasi gesekan pada selimut tiang adalah kecil (≤ 5 mm) dan tidak bergantung pada jenis tanah, jenis tiang maupun ukuran tiang. Vesic (1977) dan Sharma (1988) mengemukakan jikalau peralihan ini dapat mencapai 10 mm. Peralihan yang diperlukan untuk memobilisasi perlawanan ujung sebaliknya lebih besar, tergantung pada jenis tanah, jenis tiang dan ukuran tiang. Dengan begitu gesekan selimut akan termobilisasi lebih dahulu yang kemudian disusul dengan perlawanan ujung tiang.

Pada kelompok tiang penurunan umumnya akan lebih besar daripada penurunan pada fondasi tiang tunggal, dikarenakan pengaruh tegangan pada daerah yang lebih luas dan lebih dalam.

2.6.1 Penurunan Kelompok Tiang Pada Tanah Pasir

2.6.1.1 Metode Vesic (1977)

Metode Vesic (1977) memberikan formula sederhana sebagai berikut :

$$Sg = Se \cdot \sqrt{\frac{Bg}{D}} \quad \text{.....(2.22)}$$

Dimana :

S_e = penurunan elastis fondasi tiang tunggal

S_g = penurunan kelompok tiang

B_g = lebar kelompok tiang

D = diameter atau sisi tiang tunggal

2.6.1.2 Metode Mayerhof (1976)

Metode Mayerhof (1976) memberikan rumus empiris sederhana dalam memperkirakan penurunan kelompok tiang berdasar hasil *Standard Penetration Test* (SPT) dan hasil uji sondir.

- Berdasarkan hasil *Standard Penetration Test* (SPT)

$$Sg = 2 \cdot q \cdot \sqrt{\frac{Bg \cdot I}{N}} \quad \text{.....(2.23)}$$

$$I = [1 - \frac{L}{8.Bg}] \geq 0.5 \quad \text{.....(2.24)}$$

Keterangan :

q = tekanan pada dasar fondasi (ton/ft^2)

Bg = lebar kelompok tiang (ft)

N = nilai rata-rata N_{SPT} terkoreksi pada kedalaman ≅ Bg dibawah kelompok fondasi tiang

L = Panjang tiang (ft)

Untuk pasir kelanauan, nilai S_g dari persamaan tersebut diatas harus dikalikan dua.

- Berdasarkan data sondir (q_c)

$$S_g = \frac{q \cdot Bg \cdot I}{2.qc} \quad \text{.....(2.25)}$$

Rumus-rumus tersebut diatas berdasarkan anggapan bahwa tanah memiliki sifat homogen dalam daerah pengaruh fondasi.

2.6.2 Penurunan Kelompok Tiang Pada Tanah Lempung

Ada dua komponen penurunan fondasi tiang pada tanah kohesif, yaitu :

- Penurunan seketika (*short term settlement*) yang terjadi segera setelah beban bekerja.
- Penurunan konsolidasi atau penurunan jangka panjang, yang terjadi secara bertahap bersamaan dengan disipasi tekanan air pori ekses.

Pada penurunan seketika bisa menggunakan metode yang digunakan pada tanah pasir. Perkiraan penurunan kelompok fondasi tiang di tanah lempung dapat diperkirakan dengan menggunakan prosedur sebagai berikut:

- Tentukan tegangan kerja:

$$q = \frac{Q}{Bg.Lg} \quad \text{.....(2.26)}$$

Tegangan kerja ini haruslah lebih kecil dari tegangan ijin tanah.

- Beban yang bekerja di atas kelompok tiang dialihkan pada kedalaman 2/3 dari panjang tiang di bawah *pile cap*. Penurunan tanah diatas kedalaman tersebut sangat kecil dan bisa diabaikan.
- Beban kerja yang sudah dipindahkan tersebut selanjutkan disebarkan ke bawah fondasi tiang dengan mengambil asumsi pola penyebaran vertikal : horizontal = 2 : 1.
- Lapisan tanah yang berkonsolidasi dibagi beberapa lapis lebih tipis, untuk tiap lapis harus ditentukan parameter kompresibilitas berupa *compression index* atau C_c, tegangan efektif awal (pO') dan besarnya peningkatan tegangan (Δp) akibat beban yang bekerja. Hitung penurunan atau kompresi konsolidasi dari setiap lapis. Penjumlahan penurunan konsolidasi dari seluruh lapis adalah penurunan konsolidasi dari kelompok tiang. Untuk tanah lempung terkonsolidasi norrmal (NC) digunakan persamaan sebagai berikut :

  $$Sg = \sum \left[\frac{Cc\ .\Delta H}{1+eo}\ .\log(\frac{p'o+\Delta p}{po'})\right] \quad \text{.....(2.27)}$$

  Jikalau tanah tekonsolidasi berlebihan (OC), maka perlu untuk menggunakan C_r (*rebound compression index*) dan harus ditinjau terlebih dahulu nilai ($p'_o + \Delta p$) terhadap p_c' (tegangan prakonsolidasi atau *preconsolidation pressure*) di kedalaman yang ditinjau.

  Jika $(p'_o + \Delta\, p) \leq p_c'$, maka digunakan persamaan sebagai berikut :

  $$S_g = \sum \left[\frac{Cr\ .\Delta H}{1+eo}\ .\log(\frac{p'o+\Delta p}{po'})\right] \quad \text{.....(2.28)}$$

  Jika ternyata $(p'_o + \Delta\, p) \leq p_c'$, maka penurunan konsolidasi harus dihitung dengan persamaan berikut :

  $$Sg = \sum \left[\frac{Cr\ .\Delta H}{1+eo}\ .\log\left(\frac{p'c}{po'}\right) + \cdots \frac{Cc\ .\Delta H}{1+eo}\ .\log(\frac{p'o+\Delta p}{po'})\right] \quad \text{.....(2.29)}$$

Pada persamaan-persamaan diatas, ΔH adalah ketebalan dari lapis yang ditinjau, sedangkan e_o adalah angka pori yang sesuai dengan p'_o pada lapis yang ditinjau.

Berdasarkan SNI 8460:2017 tentang persyaratan perancangan geoteknik pasal 9.2.4.3 bahwa "penurunan izin < 15 cm + b/600 (b dalam satuan cm) untuk bangunan tinggi dan bisa dibuktikan struktur atas masih aman".

2.7 Plaxis V.8.6

Plaxis V.8.6 merupakan sebuah paket program yang disusun berdasarkan metode elemen hingga yang sudah dikembangkan secara khusus untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas dalam bidang rekayasan geoteknik. Prosedur pembuatan model secara grafis yang mudah memungkinkan pembuatan suatu model elemen hingga yang rumit dapat dilakukan dengan cepat, sedangkan berbagai fasilitas yang tersedia bisa digunakan dalam menampilkan hasil komputasi secara mendetil. Proses perhitungan sepenuhnya berjalan secara otomatis dan didasarkan pada prosedur numerik yang handal.

Analisis menggunakan program Plaxis V.8.6 pada sebuah program membutuhkan adanya pemodelan terlebih dahulu. Secara garis besar pemodelan geometri pada Plaxis V.8.6 dibagi menjadi 3 yaitu ;

1. *Axysimetris*

   Pemodelan *axysimetris* digunakan pada struktur yang simetris.

2. *Plane Strain*

   Pemodelan *plain strain* biasanya digunakan pada struktur pemodelan struktur memanjang. Misalnya dinding penahan tanah dan saluran drainase.

3. *Plane Stress*

   Pemodelan *plane stress* biasanya digunakan untuk pemodelan portal

Pemodelan geometri secara garis besar pada program Plaxis V.8.6 ini menggunakan tiga buah komponen utama yaitu : titik, garis dan klaster. Sebuah model geometri yang lengkap akan mencakup massa tanah yang dapat dibagi

menjadi beberapa lapisan tanah yang berbeda, elemen-elemen struktural, tahapan-tahapan konstruksi serta pembebanan. Apabila model geometri telah terbentuk, maka suatu model elemen hingga secara otomatis terbentuk dengan komposisi dari klaster-klaster dan garis-garis yang membentuk model geometri tersebut.

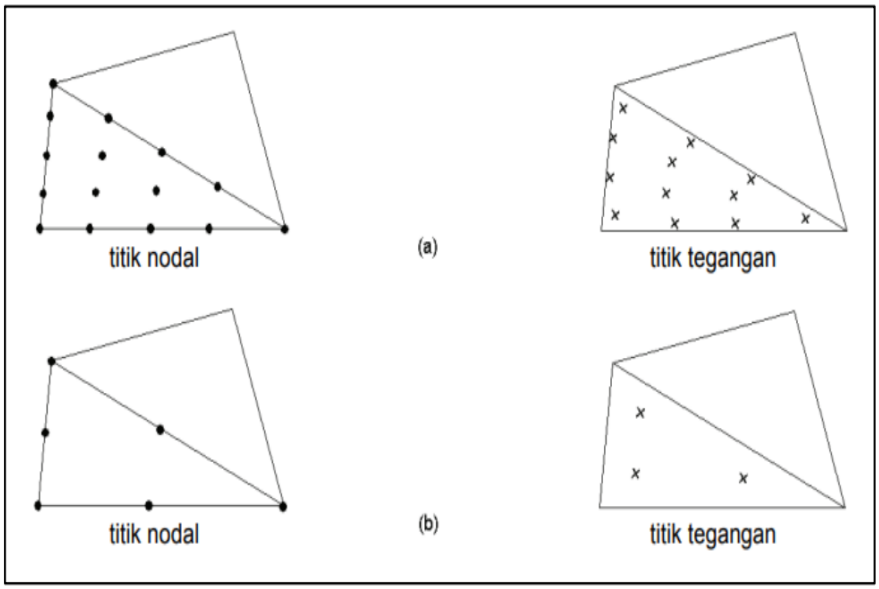
Komponen penyusun sebuah jaring elemen hingga dapat dibedakan kedalam tiga jenis, yaitu :

1. Elemen

   Pemilihan elemen bisa digunakan dengan memilih elemen dengan 15 buah titik nodal atau dengan 6 buah titik nodal. Elemen 15 titik nodal berguna untuk menghasilkan perhitungan yang akurat. Sedangkan elemen dengan 6 titik nodal dapat dipilih dalam melakukan proses perhitungan yang singkat.
2. Titik Nodal

   Dalam program ini pilihan titik nodal ada dua, yaitu 15 titik nodal dan 6 titik nodal.
3. Titik Tegangan

   Ttitk tegangan adalah titik integrasi Gauss yang digunakan dalam menghitung tegangan dan regangan. Sebuah elemen 15 titik nodal memiliki 12 buah titik tegangan seperti yang ditunjukan pada Gambar 2.16 bagian a. Sedangkan elemen 6 titik nodal memiliki 3 buah titik tegangan seperti yang ditunjukan pada Gambar 2.16 bagian b.



Gambar 2.16 Contoh kerusakan bangunan akibat penurunan

Adapun jenis pemodelan tanah pada program Plaxis V.8.6 antara lain :

1. Model Mohr-Coulomb

Pemodelan Mohr-Coulumb mengasumsikan bahwa perilaku tanah bersifat plastis sempurna (*linear elastic perfectly plastic model*), dengan menetapkan suatu nilai tegangan batas dimana titik tersebut tegangan tidak lagi dipengaruhi oleh regangan. *Input* parameter meliputi 5 (lima) buah parameter yaitu :

- *Young's* Modulus (E), *Poisson's ratio* (υ) yang memodelkan keelatisitasan tanah
- Kohesi (c), sudut geser (ø) memodelkan perilaku plastis dari tanah.
- Sudut dilantasi (ψ) memodelkan perilaku dilantasi tanah.

Pada pemodelan tanah Mohr-Coulumb biasanya dianggap bahwa nilai E konstan untuk suatu kedalaman di suatu jenis tanah, tapi jika diperlukan adanya peningkatan nilai E perkedalaman tertentu disediakan input tambahan pada program Plaxis V.8.6. Selain 5 (lima) buah parameter diatas, kondisi tanah awal memiliki peran penting dalam masalah deformasi tanah. Nilai Poisson's ratio (υ) pada pemodelan tanah Mohr-Coulumb didapat dari hubungannya dengan koefisien tekanan.

$K_0 = \frac{\sigma h}{\sigma v}$ ……...(2.30)

Dimana : $\frac{\upsilon}{1-\nu} = \frac{\sigma h}{\sigma v}$

Secara garis besar nilai υ bervariasi dari 0,3 sampai 0,4 namun untuk kasus-kasus penggalian (unloading) nilai υ yang lebih kecil masih realistis. Nilai kohesi c dan sudut geser ø diperoleh dari uji Geser Triaxial atau diperoleh dari hubungan empiris berdasarkan dari uji lapangan. Sementara sudut dilantasi (ψ) digunakan untuk memodelkan regangan volumentrik plastic yang memiliki nilai positif. Pada tanah lempung, umumnya tidak terjadi dilantasi (ψ), sementara pada tanah pasir dilantasi tergantung dari kerapatan dan sudut geser (ø) dimana ψ = ø - 30°. Jika ø < 30° maka ψ = 0. Sudut dilantasi (ψ) bernilai negatif hanya bersifat realistis jika diaplikasikan pada pasir lepas.

Parameter-parameter yang digunakan pada program Plaxis V.8.6 :

1. Tanah

   Model tanah yang dipilih yaitu model Mohr-Coulumb, dimana perilaku tanah dianggap elastisitas dengan parameter yang dibutuhkan yaitu :

   a. Modulus elastisitas, E (stiffness modulus).
   b. Poisson's ratio (μ) diambil 0,2 – 0,4.
   c. Sudut geser dalam (ø) didapat dari hasil pengujia laboratorium.
   d. Kohesi (c) di dapat dari hasil pengujian laboratorium.
   e. Sudut dilantasi (ψ) diamsusikan sama dengan nol.
   f. Berat isi tanah γ (kN/m^3) didapat dari hasil pengujian laboratorium.

   Parameter tanah:

   a. Modulus Young (E)

      Karena sulitnya pengambilan contoh asli di lapangan untuk tanah granular maka beberapa pengujian lapangan (in-situ test) sudah dikerjakan untuk mengestimasi nilai modulus elastisitas tanah. Terdapat beberapa usulan nilai Es yang diberikan oleh peneliti, diantaranya pengujian Sondir yang dilakukan oleh (De Beer,1965) dan (Webb, 1970) memberikan korelasi antara tahanan kerucut qc dan Es sebagai berikut :

      E_s 2.qc (dalam satuan kg/cm)

Bowles memberikan persamaan yang dihasilkan dari pengumpulan data pengumpulan data CPT (Sondir), sebagai berikut :

Es = 3.qc (untuk pasir)

Es = 2 sampai dengan 8.qc (untuk lempung) (kg/cm^2)

Nilai modulus elastis yang dihubungkan dengan nilai SPT, sebagai berikut :

$E_b = 6 (N + 5) k/ft^2$ (untuk pasir berlempung)

$E_b = 10 (N + 10)$ k/ft^2 (untuk pasir)

Hasil hubungan yang diperoleh adalah modulus elastisitas undrained (E_s) sedangkan input yang dibutuhkan adalah modulus elastis efektif (Es').

$$E_s' = \frac{Es\ (1+v)}{1,5} \quad \text{.....(2.31)}$$

sedangkan untuk keperluan praktis dapat dipakai rumus sebagai berikut:

$E_s' = 0,8\ E_s$ .....(2.32)

Tabel 2.6 Nilai perkiraan modulus elestisitas tanah (Hardiyatmo,2012)

Macam tanah	E_s (Kg/cm^2)
Lempung	
1. Sangat lunak	3 – 30
2. Lunak	20 – 40
3. Sedang	45 – 90
4. Berpasir	300 – 425
Pasir	
1. Berlanau	50 – 200
2. Tidak padat	100 – 250
3. Padat	500 – 1000
Pasir dan kerikil	
1. Padat	800 – 2000
2. Tidak padat	500 – 1400
Lanau	20 – 200

Loses	150 – 600
Cadas	1400 – 14000

Tabel 2.7 Korelasi N-SPT dengan modulus elastisitas pada tanah lempung (Randolph, 1978)

Subsurface condition	*Penetration resistance range* N (bpf)	Ɛ50 (%)	Poisson's ratio (v)	*Shear strengh Su* (psf)	*Young's modulus range* E_s (psi)	*Shear modulus range* G (psi)
Very soft	2	0,020	0,5	250	170-340	60-110
Soft	2-4	0,020	0,5	375	260-520	80-170
Medium	4-8	0,020	0,5	750	520-1040	170-340
Stiff	8-15	0,010	0,45	1500	1040-2080	340-690
Very stiff	15-30	0,005	0,40	3000	2080-4160	690-1390
Hard	30	0,004	0,35	4000	2890-5780	960-1930
	40	0,004	0,35	5000	3470-6940	1150-2310
	60	0,0035	0,30	7000	4860-9720	1620-3420
	80	0,0035	0,30	9000	6250-12500	2080-4160
	100	0,003	0,25-	11000	7640-15270	2540-5090
	120	0,003	0,25	13000	9020-18050	3010-6020

Tabel 2.8 Korelasi N-SPT dengan modulus elastisitas pada tanah pasir (Schmertman,1970)

Subsurface condition	*Penetration resistance range* (N)	*Friction angle* Ø (deg)	Poisson,s ratio (μ)	*Cone penetration* qc=4N	*Relatif density* dr (%)	*Young's modulus range* E_s (psi)	*Shear modulus range* G (psi)
Very loose	0-4	28	0,45	0-16	0-15	0-440	0-160
Loose	4-10	28-30	0,4	16-40	15-35	440-1100	160-390
Medium	10-30	30-36	0,35	40-120	35-65	1100-3300	390-1200
Dense	30-50	36-41	0,3	120-100	65-85	3300-5500	1200-1990
Very dense	50-100	41-45	0,2	200-400	85-100	5500-11000	1990-3900

b. Poisson’s ratio (μ)

Poisson ratio nilainya sering dianggap sebesar 0,2-0,4 dalam pekerjaan mekanika tanah. Nilai sebesar 0,5 biasanya dipakai untuk tanah jenuh dan nilai 0 (nol) sering dipakai pada tanah kering dan tanah lainnya untuk kemudahan dalam perhitungan. Namun pada program Plaxis khusnya model tanah *undrained* μ' < 0,5. Untuk nilai Poisson’s ratio efektif (μ') diperoleh dari hubungan jenis tanah, konsistensi tanah dengan Poisson’s ratio.

Tabel 2.9 Hubungan Jenis Tanah, Konsistensi dan Poisson’s Ratio (μ) (Hardiyatmo,2011)

Soil type	*Description*	(μ')
Clay	Soft	0,35 - 0,40
	Medium	0,30 - 0,35
	Stiff	0,20 - 0,30
Sand	Loose	0,15 – 0.25
	Medium	0,25 - 0,30
	Dense	0,25 - 0,35

a) Sudut geser dalam

Sudut geser dalam adalah sudut yang dipentuk dari hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser di dalam material tanah dan batuan. Sudut geser dalam merupakan sudut rekahan yang dibentuk bila suatu material dikenai tegangan atau gaya terhadapnya yang melebihi tegangan gesernya. Semakin besar sudut geser pada suatu material maka material tersebut akan lebih tahan menerima tegangan luar yang dikenakan terhadapnya. Sudut Geser Dalam (ø) dapat ditentukan berdasarkan hubungan antara Sudut Geser Dalam dengan Jenis Tanah.

Tabel 2.10 Hubungan Jenis Tanah, Konsistensi dan Poisson's Ratio (μ) (Hardiyatmo,2011)

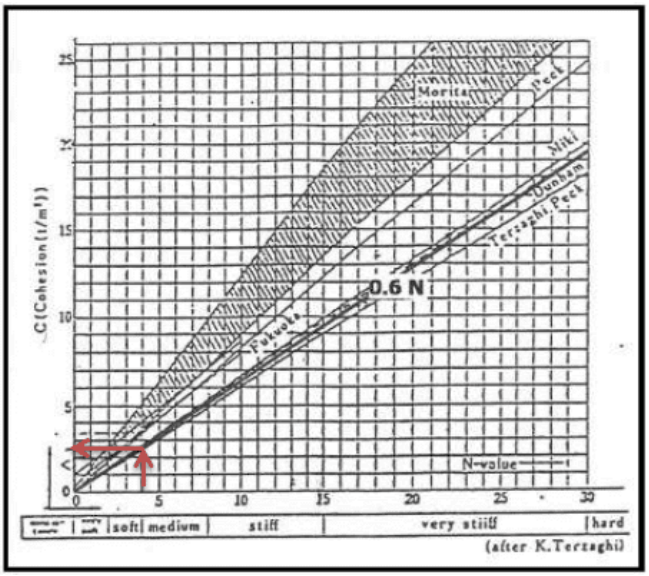
Jenis Tanah	Sudut Geser Dalam
Kerikil kepasiran	35° – 40°
Kerikil Kerakal	35° – 40°
Pasir Padat	35° – 40°
Pasir Lepas	30°
Lempung Kelanauan	25° – 30°
Lempung	20° – 25°

Sumber: Buku Mekanika Tanah, Braja M. Das Jilid 1

b) Kohesi (Cu)

Kohesi merupakan gaya tarik menarik antara partikel dalam batuan, dinyatakan dalam satuan berat per satuan luas. Kohesi berbanding lurus dengan kerapatan suatu benda, sehingga bila kerapatan semakin besar maka kohesi yang akan didapatkan akan semakin besar. Nilai Kohesi (Cu) menunjukkan besarnya kohesi tanah dalam kondisi tak terdrainase (*undrained shear strength*).

Nilai kohesi (Cu) diperoleh berdasarkan pengujian laboratorium yaitu pengujian kuat geser langsung (*Direct Shear Strength Test*) dan pengujian Triaxial (*Triaxial Test*). Berdasarkan grafik pada Gambar 2.17, secara umum nilai Cu dapat diambil sebesar 0,6 kali nilai N-SPT dimana Cu adalah dalam satuan ton/m^2.



Gambar 2.17 Hubungan Nilai Kohesi dan N-SPT pada tanah kohesif (terzaghi, 1943)

Terzaghi dan Peck (1967) memberikan hubungan variasi nilai N-SPT dengan nilai kohesi tak terdrainasi (cu) pada tabel

Tabel 2.11 Korelasi N-SPT dengan cu tanah lempung (Terzaghi dan Peck, 1967)

Konsistensi	*N*	c_u *(kN/m²)*
Sangat lunak	0-2	<12
Lunak	2-4	12-25
Sedang	4-8	25-50
Kaku	8-15	50-100
Sangat kaku	15-30	100-200
Keras	>30	>200

c) Sudut dilantasi (ψ)

Sudut Dilatansi adalah sudut yang bergantung dari kepadatan dan sudut geser dalam tanah pasiran (ψ = ϕ - 30°). Apabila sudut geser dalam besarnya kurang dari 30°, maka sudut dilatansi sama dengan nol, begitu pula pada tanah lempung ψ = 0.

d) Berat isi tanah

Berat isi tanah dapat dibagi menjadi dua jenis antara lain :

- Berat jenis tanah kering (γ_{dry})

  Berat jenis tanah kering merupakan perbandingan antara berat tanah kering dengan satuan volume tanah. Berat jenis tanah kering dapat diperoleh dari data *soil test* dan *direct shear*.

- Berat jenis tanah jenuh (γ_{sat})

  Berat jenis tanah jenuh adalah perbandingan antara berat tanah jenuh air dengan satuan volume tanah jenuh.

  Korelasi nilai N-SPT dilakukan untuk mendaptkan nilai berat volume tanah (γ) dan nilai sudut geser dalam (ϕ), dapat dilihat pada Tabel 2.17 berikut :

Tabel 2.12 Nilai tipikal berat volume tanah

JENIS TANAH	ɣsat (kn/m3)	ɣdry (kn/m3)
Kerikil	20 - 22	15 - 17
Pasir	18 - 20	13 - 16
Lanau	18 - 20	14 - 18
Lempung	16 - 22	14 - 21

(Sumber : Soil Mechanics and Foundation, John Wiley & Sons, 2000)

2) Model Tanah Lunak (Soft Soil)

Seperti pada pemodelan Mohr-Coulomb, batas kekuatan tanah dimodelkan dengan parameter kohesi (c), sudut geser dalam tanah (ϕ), dan sudut dilantasi (ψ). Sedangkan pada kekuatan tanah dimodelkan menggunakan parameter λ* dan k*, yang merupakan parameter kekakuan yang didapatkan dari uji triaxial maupun oedometer.

$$\lambda^* = \frac{Cc}{2.3(1+e)} \quad \text{.....(2.33)}$$

$$k^* = \frac{2Cs}{2.3(1+e)} \quad \text{.....(2.34)}$$

Model Soft Soil ini bisa memodelkan beberapa hal sebagai berikut :

a) Kekakuan yang berubah bersama dengan tegangan (*Stress Dependent Stiffness*)

b) Membedakan pembebanan primer (*primary loading*) terhadap *unloading – reloading.*

c) Mengingat tegangan pra – konsolidasi.

2.8 *Analytical Hierarchy Process* (AHP)

Dalam suatu pekerjaan konstruksi perencana harus mengetahui dengan baik konsekuensi yang akan diterima dalam pengambilan keputusan. Dengan sejumlah kriteria untuk menentukan pengambilan suatu keputusan kemudian diperlukan pengambilan keputusan multikriteria. Struktur Fondasi yang berfungsi mentransmisikan beban yang didukung oleh beratnya sendiri ke dalam tanah atau batuan berada di bawahnya (Bowles, 1998), tidak pernah lepas dari masalah. Jenis-jenis fondasi ada begitu banyak sehingga dalam memilih jenis fondasi yang akan

dipilih untuk digunakan, pengambil keputusan harus mempertimbangkan kriteria yang ada.

Thomas L. Saaty mengembangkan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) pada tahun 1970-an. Metode ini merupakan salah satu model pengambilan keputusan multikriteria yang dapat membantu kerangka berpikir manusia dimana faktor logika, pengalaman pengetahuan, emosi dan rasa dioptimasikan ke dalam suatu proses sistematis. Pada dasarnya, AHP merupakan metode yang digunakan untuk memecahkan masalah yang kompleks dan tidak terstruktur ke dalam kelompok-kelompoknya, dengan mengatur kelompok tersebut ke dalam suatu hierarki, kemudian memasukkan nilai numerik sebagai pengganti persepsi manusia dalam melakukan perbandingan relatif. Dengan suatu sintesa maka akan dapat ditentukan elemen mana yang mempunyai prioritas tertinggi.

Manfaat dari penggunaan Analytical Hierarchy Process (AHP) antara lain yaitu: memadukan intuisi pemikiran, perasaan dan penginderaan dalam menganalisa pengambilan keputusan, memperhitungkan konsistensi dari penilaian yang telah dilakukan dalam membandingkan faktor-faktor yang ada, dan memudahkan pengukuran dalam elemen, memungkinkan perencanaan ke depan.

Kelebihan metode ini menurut Badiru (1995) adalah: struktur yang jelas hirarkis adalah konsekuensi dari kriteria yang dipilih hingga subkriteria terdalam, dengan memperhatikan validitas sampai dengan batas toleransi ketidakkonsistenan berbagai kriteria dan alternatif yang dipilih oleh pengambil keputusan, dan memperhitungkan daya tahan atau ketahanan output analisis sensitivitas pembuat keputusan. Selain memiliki kelebihan, metode Analytical Hierarchy Process (AHP) ini juga memiliki banyak keunggulan penggunaannya.

Berbagai keuntungan AHP menurut Saaty (1993) adalah sebagai berikut.

- Kesatuan, yaitu AHP memberi satu model tunggal yang mudah dimengerti, luwes untuk aneka ragam persoalan terstruktur.
- Kompleksitas, yaitu AHP memadukan rancangan berdasarkan sistem dalam memecahkan persoalan kompleks.

- Saling ketergantungan, yaitu AHP dapat menangani saling ketergantungan elemen-elemen dalam suatu sistem dan tidak memaksakan pemikiran linier.
- Penyusunan hierarki, yaitu AHP mencerminkan kecenderungan alami pikiran untuk memilih elemen-elemen suatu sistem dalam tingkat yang berbeda dan mengelompokkan unsur yang serupa dalam setiap tingkat.
- Pengukuran, yaitu AHP memberi suatu skala untuk mengukur hal-hal wujud suatu metode untuk menetapkan prioritas.
- Konsistensi, yaitu AHP melacak konsistensi logis dari berbagai pertimbangan yang digunakan dalam menetapkan berbagai prioritas.
- Sintesis, yaitu AHP menuntun ke suatu taksiran menyeluruh tentang kebaikan setiap alternatif.
- Tawar menawar, yaitu AHP mempertimbangkan prioritas-prioritas relatif dari berbagai faktor sistem dan memungkinkan orang memilih alternatif terbaik berdasarkan tujuan-tujuan mereka.
- Penilaian dan consensus, yaitu AHP tak memaksakan konsensus tetapi mensintesis suatu hasil yang representatif dari berbagai penilaian yang berbeda-beda.
- Pengulangan proses, yaitu AHP memungkinkan orang memperhalus definisi mereka pada suatu persoalan dan memperbaiki pertimbangan dan pengertian mereka melalui pengulangan.

Meskipun memiliki kelebihan, metode AHP juga memiliki kelemahan yaitu: orang yang terlibat adalah orang yang memiliki pengetahuan atau pengalaman yang banyak terkait dengan hal yang akan dilakukan dipilih menggunakan metode AHP, dan melakukan perbaikan keputusan harus dimulai lagi dari tahap awal.

2.8.1 Prinsip Dasar *Analytical Hierarchy Process* (AHP)

Berdasarkan Saaty (1993), prinsip dasar dalam proses penyusunan model hierarki analitik dalam AHP, meliputi:

a) *Problem Decomposition* (Penyusunan Hierarki Masalah)

Dalam penyusunan hierarki ini perlu dilakukan perincian atau pemecahan dari persoalan yang utuh menjadi beberapa unsur/komponen yang kemudian dari

komponen tersebut dibentuk suatu hierarki. Pemecahan unsur ini dilakukan sampai unsur tersebut sudah tidak dapat dipecah lagi sehingga didapat beberapa tingkat suatu persoalan. Penyusunan hierarki merupakan langkah penting dalam model analisa hierarki. Adapun langkah-langkah penyusunan hierarki adalah diawali dengan identifikasi tujuan keseluruhan dan subtujuan, mencari kriteria untuk memperoleh subtujuan dari tujuan keseluruhan, menyusun subkriteria dari masing-masing kriteria, dimana setiap kriteria dan subkriteria harus spesifik dan menunjukkan tingkat nilai dari parameter atau intensitas verbal, menentukan pelaku yang terlibat, kebijakan dari pelaku, dan penentuan alternatif sebagai output tujuan yang akan ditentukan prioritasnya.

b) *Comparative Judgement* (Penilaian Perbandingan Berpasangan)

Prinsip ini dilakukan dengan membuat penilaian perbandingan berpasangan tentang kepentingan relatif dari dua elemen pada suatu tingkat hierarki tertentu dalam kaitannya dengan tingkat di atasnya dan memberikan bobot numerik berdasarkan perbandingan tersebut. Hasil penelitian ini disajikan dalam matriks yang disebut *pairwise comparison*.

c) *Synthesis of Priority* (Penentuan Prioritas)

Sintesa adalah tahap untuk mendapatkan bobot bagi setiap elemen hierarki dan elemen alternatif. Karena matriks pairwise comparison terdapat pada setiap tingkat untuk mendapatkan *global priority*, maka sintesis harus dilakukan pada setiap *local priority*. Prosedur pelaksanaan sintesis berbeda dengan bentuk hierarki. Sedangkan pengurutan elemen-elemen menurut kepentingan relatif melalui prosedur sintesis dinamakan *priority setting*.

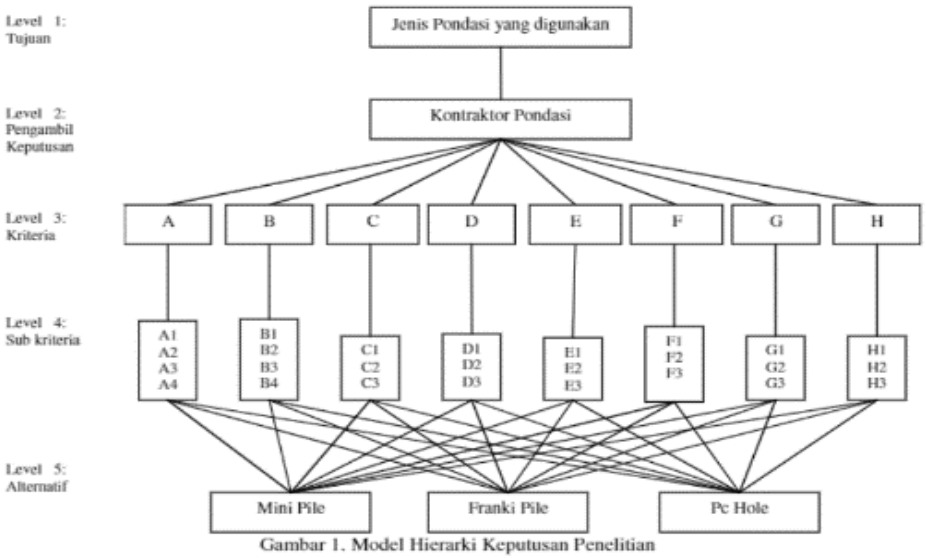
d) *Logical Consistensy* (Konsistensi Logis)

Konsistensi berarti dua makna atau obyek yang serupa. Konsistensi data didapat dari rasio konsistensi (CR) yang merupakan hasil bagi antara indeks konsistensi (CI) dan indeks random (RI). Metode AHP sudah banyak dilakukan di berbagai Negara bahkan di Indonesia sendiri. Sebagai contoh antara lain:

- Penerapan metode AHP oleh Walailak Atthirawong dan Bart MacCarthy dengan permasalahan Pemilihan Negara Terbaik atau Paling Strategis Untuk Lokasi Industri Pabrik, dengan studi kasus pada Proyek di Singapura dan Thailand.

- Penerapan metode AHP oleh Connie Susilawati, Jani Rahardjo dan Yeni Yudiyanti dengan permasalahan Pengukuran Kualitas Gedung Perbelanjaan di Surabaya, dengan studi kasus Tunjungan Plaza Surabaya dan Plaza Surabaya.

2.8.2 Pemodelan Hierarki *Analytical Hierarchy Process* (AHP)



Gambar 1. Model Hierarki Keputusan Penelitian

Keterangan:

A = Ekonomis	B = Kondisi tanah	C = Efisiensi waktu	D = Pelaksanaan	E = Teknis pondasi
F = Lingkungan	G = Alat dan bahan	H = Tenaga	A1 = Biaya pembuatan pondasi	A2 = Biaya pengadaan alat
A3 = Biaya galian pondasi	A4 = Biaya tenaga kerja	B1 = Tanah kerikil	B2 = Tanah pasir	B3 = Tanah lanau
B4 = Tanah Lempung	C1 = Biaya pelaksanaan pondasi	C3 = Waktu Pelaksanaan	D1 = Efisiensi waktu	D2 = Efisiensi biaya
D3 = Efisiensi Tenaga	E1 = Waktu pelaksanaan	E2 = Biaya pelaksanaan	E3 = Kualitas/hasil pelaksanaan	F1 = Waktu pengadaan alat dan bahan
F2 = Pekerjaan Proyek	F3 = Pencemaran	G1 = pengadaan alat dan bahan	G3 = Biaya	H1 = Kualitas tenaga kerja
H2 = Keselamatan kerja	H3 = Jumlah tenaga kerja			

Gambar 2.18 Model hierarki keputusan pemilihan

(Sumber: Nugroho, M.C.A.,dan Wijaya,G.P. 2010. *Analisa Studi Penggunaan AHP Pada Pengambilan Keputusan Pemilihan Jenis Sub Struktur Pada Proyek Konstruksi*.)

2.8.3 Skala Perbandingan Berpasangan

Menurut Saaty (1993) penetapan skala kuantitatif digunakan untuk menilai perbandingan tingkat kepentingan suatu elemen terhadap elemen lain dapat dilihat pada tabel sebagai berikut:

Tabel 2.13 Skala Perbandingan

Intensitas Kepentingan	Keterangan	Penjelasan
1	Kedua elemen sama pentingnya	Dua elemen yang mempunyai pengaruh yang sangat besar terhadap tujuan
3	Elemen yang satu sedikit lebih penting daripada elemen lainnya	Pengalaman dan penilaian sedikit menyokong satu elemen dibanding elemen lainnya
5	Elemen yang satu lebih penting daripada elemen lainnya	Pengalaman dan penilaian sangat kuat menyokong satu elemen lainnya
7	Satu elemen jelas lebih mutlak penting daripada elemen lainnya	Satu elemen yang kuat menyokong satu elemen dibanding elemen lainnya
9	Satu elemen mutlak penting daripada elemen lainnya	Bukti yang mendukung satu elemen terhadap elemen yang lain memiliki tingkat penegasan tertinggi yang mungkin menguatkan
2,4,6,8	Nilai-nilai antara dua nilai pertimbangan yang berdekatan	Nilai ini diberikan bila ada dua kompromi diantara dua pilihan
Kebalikan	Jika untuk aktivitas *i* mendapatkan satu angka dibandingkan dengan aktivitas *j* maka *j* mempunyau nilai kebalikannya dibandingan dengan nilai *i*	

Sumber: Saaty (1993 : 85-86)

2.8.4 Perhitungan *Analytical Hierarchy Process* (AHP)

Menurut Saaty (1993) elemen-elemen pada setiap baris dari matriks persegi merupakan hasil perbandingan berpasangan. Setiap matriks *pairwise comparison* dicari eigenvector-nya untuk mendapat *local priority*. Skala perbandingan berpasangan didasarkan pada nilai-nilai fundamental AHP dengan pembobotan dari nilai 1 untuk sama penting, sampai dengan 9 untuk sangat penting sekali. Berdasarkan susunan matriks perbandingan berpasangan dihasilkan sejumlah prioritas, yang merupakan pengaruh relative sejumlah elemen pada elemen di dalam tingkat yang ada di atasnya. Penyimpangan dari konsekuensi dinyatakan dalam indeks konsistensi yang didapat dari rumus :

$$CI = \frac{\lambda_{maks} - n}{n-1} \quad \text{.....(2.35)}$$

Keterangan :

λ_{maks} = eigenvalue maksimum

n = ukuran matriks

Consistency Index (CI), matrik random dengan skala penelitian 1 sampai dengan 9, beserta kebalikannya sebagai Random Index (RI). Berdasarkan

perhitungan Saaty dengan 500 sampel, jika judgement numerik diambil secara acak dari skala 1/9, 1/8, …, 1,2, … 9 akan diperoleh rata-rata konsistensi untuk matriks dengan ukuran berbeda.

Tabel 2.14 Nilai indeks random

Ukuran Matriks	1,2	3	4	5	6	7	8	9	10
Indeks Random	0 ,0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

$$CR = \frac{CI}{RI} \leq 0{,}1 \quad \text{……(2.36)}$$

Perbandingan antara CI dan RI untuk suatu matriks didefinisikan sebagai *Consistency Ratio* (CR). Untuk model AHP matriks perbandingan dapat diterima jika nilai rasio konsistensinya tidak lebih dari 0,1 atau sama dengan 0,1.

2.8.5 Penerapan Metode AHP Dalam Pemilihan Jenis Fondasi

Metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) secara umum digunakan dalam membantu manusia mengambil keputusan yang tepat di tengah berbagai kemungkinan keputusan yang ada. Adapun langkah-langkah penerapan AHP dalam pemilihan fondasi adalah sebagai berikut:

a. Langkah I

   Menentukan tujuan yang ingin dicapai. Dalam hal ini tujuan yang ingin dicapai oleh peneliti adalah memilih fondasi yang paling sesuai.

b. Langkah II

   Langkah berikut ini terdiri dari pengambil keputusan yang berhak memberi penilaian tentang jenis fondasi yang akan dipakai.

c. Langkah III

   Berisikan tentang kriteria-kriteria yang berguna untuk memudahkan para pengambil keputusan untuk memberi nilai. Kriteria tersebut ditinjau dari segi kondisi tanah, teknis fondasi, efisiensi waktu, pelaksanaan, ekonomis, lingkungan dan biaya.

d. Langkah IV

   Level ini membagi kriteria-kriteria (sub-kriteria) yang terdapat di langkah III. Hal ini dilakukan peneliti agar mendapatkan besaran (nilai) yang sangat

sederhana, sehingga memudahkan peneliti untuk memasuki level selanjutnya.

e. Langkah V

Merupakan langkah akhir dan langkah terendah dari AHP, berisi hasil dari keseluruhan langkah di atas.