

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tanah

Tanah merupakan material yang terdiri dari beberapa komponen yaitu butiran atau agregat, mineral padat yang tidak terikat secara kimia antara satu dengan yang lainnya dari bahan organik yang telah mengalami pelapukan disertai zat cair dan gas yang mengisi ruang yang masih kosong yang terdapat didalam partikel padat. Butiran mineral yang membentuk bagian padat dari tanah merupakan hasil pelapukan dari batuan. Ukuran setiap butiran sangat bervariasi yang bergantung pada ukuran dan bentuk. Tanah umumnya dibagi menjadi kerikil atau *gravel*, pasir atau *sand*, lanau atau *silt*, dan lempung atau clay yang bergantung pada ukuran partikel yang mendominasi tanah tersebut. Menurut Das (1995) tanah batasan-batasan ukuran tanah adalah sebagai berikut :

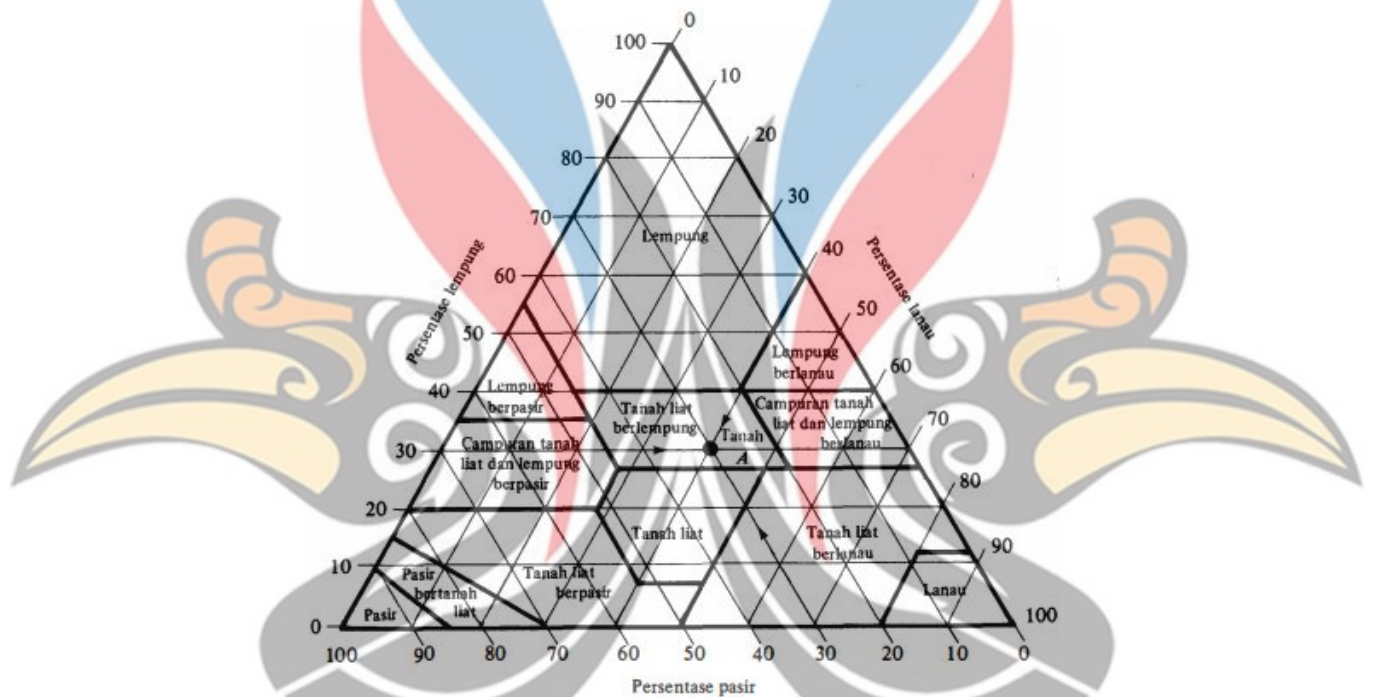
1. Kerikil (*gravel*) adalah kepingan batuan dengan ukuran 5 mm – 150 mm.
2. Pasir (*sand*) terdiri atas partikel-partikel batuan yang memiliki ukuran 0,074 mm – 5 mm.
3. Lanau (*silt*) memiliki ukuran yang sangat kecil yang terdiri dari butiran yang sangat halus berukuran 0,0002 mm – 0,0074 mm.
4. Lempung (*clay*) memiliki ukuran yang lebih kecil dari lanau dan terdiri dari mineral yang sangat halus. Lempung memiliki ukuran 0,002 mm – 0,001 mm.

2.2. Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah merupakan sistem pengaturan jenis tanah yang berbeda jenis tetapi memiliki sifat yang sama kedalam kelompok dan subkelompok berdasarkan dengan pemakaian (Das, 1995). Sistem klasifikasi tanah digunakan untuk mengetahui sifat-sifat dari jenis tanah sehingga jenis tanah yang telah diketahui sifatnya dapat dikelompokkan berdasarkan perilaku umum dari seluruh jenis tanah. Sistem klasifikasi tanah dibagi menjadi 3 bagian yaitu :

1. Klasifikasi berdasarkan tekstur

Tekstur tanah adalah keadaan permukaan tanah yang dipengaruhi oleh ukuran butiran yang ada didalam tanah. Tanah dapat dibagi kedalam 4 kelompok yaitu kerikil atau *gravel*, pasir atau *sand*, lempung atau *clay*, dan lanau atau *silt* yang diklasifikasikan berdasarkan ukuran butiran tanah. Dalam sistem klasifikasi tanah berdasarkan tekstur penamaan tanah diberi berdasarkan komponen utama yang terkandung dalam tanah tersebut misalnya lempung berpasir sehingga disebut juga dengan *sandy clay*.



Gambar 2.1 Klasifikasi tanah berdasarkan tekstur (Das, 1995).

Gambar 2.1 merupakan bagan yang digunakan untuk dapat mengetahui nilai komposisi tekstur dari jenis tanah yang telah dimodifikasi.

2. Klasifikasi tanah berdasarkan pemakaian

Klasifikasi tanah berdasarkan pemakaian memperhitungkan sifat plastisitas tanah yang disebabkan karena adanya kandungan mineral lempung yang terkandung dalam tanah.

3. Sistem klasifikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*)

Sistem klasifikasi AASHTO diklasifikasikan kedalam 7 kelompok yang mana kelompok tersebut terdiri dari kelompok A-1 sampai dengan A-7.

Pada kelompok A-1, A-2, A-3 adalah tanah berbutir yang mana 35% jumlah butiran lolos ayakan No.200 sedangkan kelompok A-4, A-5, A-6 dan A-7 merupakan tanah berbutir yang mana lebih dari 35% jumlah butiran lolos ayakan No.200.

4. Sistem klasifikasi tanah USCS (*Unified Soil Classification System*)

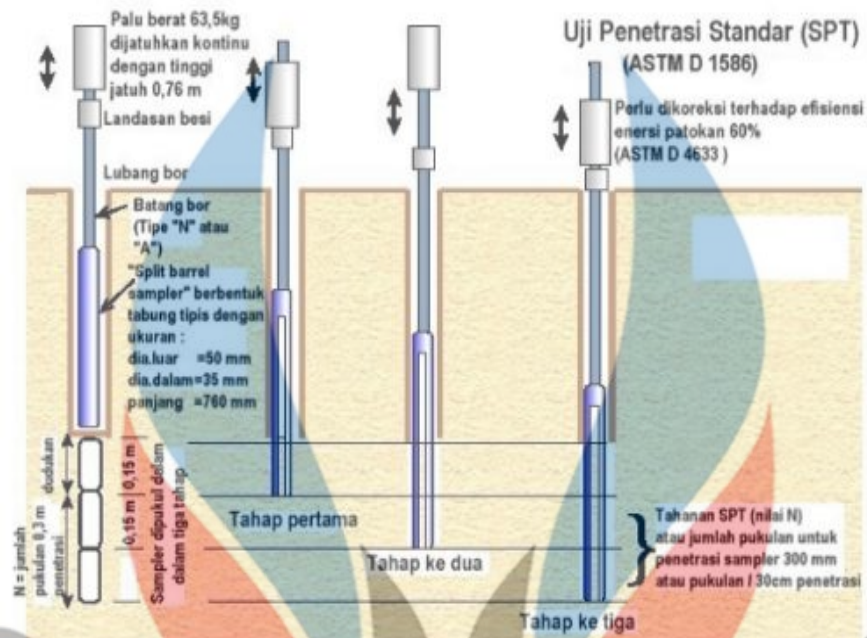
Pada sistem klasifikasi tanah USCS, tanah dibagi kedalam 2 kelompok yaitu:

- a. Tanah berbutir kasar (*coarse-grained-soil*) merupakan tanah kerikil (*gravel*) dan pasir (*sand*) yang mana jumlah berat total yang lolos ayakan No.200 berjumlah kurang dari 50%.
- b. Tanah berbutir halus (*fine-grained-soil*) merupakan tanah yang jumlah berat total lolos ayakan No.200 berjumlah lebih dari 50%.

2.3. Penyelidikan Tanah

Penyelidikan tanah merupakan hal yang perlu dilakukan untuk menentukan karakteristik dari tanah sehingga dapat diketahui bahan-bahan apa saja yang menyusun tanah tersebut sehingga dapat dijadikan dasar pondasi yang kuat untuk suatu konstruksi. Untuk mengurangi kemungkinan terganggunya tanah akibat pengambilan sampel tanah di lapangan maka dilakukan penyelidikan tanah secara langsung (*in-situ test*) agar pondasi yang akan dibangun tidak dipengaruhi oleh kerusakan tanah akibat kegiatan penyelidikan tanah yang dilakukan. Salah satu penyelidikan tanah di lapangan yaitu *Standard Penetration Test* atau SPT.

Standard Penetration Test (SPT) adalah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui kedalaman dan tebal masing-masing lapisan tanah. *Standard Penetration Test* (SPT) dilakukan dengan dilakukannya pemukulan tabung belah dengan kedalaman 300 mm dan pengukuran jumlah pukulan yang dilakukan. Dalam pemukulan dilakukan dengan menggunakan palu atau *hammer* dengan berat 63,5 kg dengan ketinggian jatuh palu setinggi 0,76 m dan dilakukan berulang. *Standard Penetration Test* (SPT) dilakukan sebanyak 3 tahap. Pada tahap pertama hasil pengujian dicatat sebagai dudukan dan pada tahap kedua dan tahap ketiga jumlah pukulan dicatat untuk selanjutnya dapat diketahui nilai pukulan (N).



Gambar 2.2 Pengujian SPT (SNI 4153-2008)

Nilai pukulan (N) yang didapatkan dari pengujian di lapangan diperlukan untuk dicari nilai koreksi untuk nilai pukulan (N_{60}) terhadap efisiensi alat atau cara pengujian. Untuk mencari nilai koreksi pukulan (N_{60}) digunakan persamaan yaitu sebagai berikut :

$$\text{Koreksi N-SPT : } N_{60} = \frac{E_m \times C_s \times C_b \times C_r}{0,60} \times N \quad (2.1)$$

Dimana :

- N_{60} = Nilai koreksi N-SPT terhadap cara pengujian
- E_m = *Hammer efficiency*
- C_s = Koreksi sampler
- C_b = Koreksi diameter bor
- C_r = Koreksi panjang tali
- N = Nilai N-SPT lapangan

Adapun untuk mengetahui nilai *hammer efficiency* dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Efisiensi Palu (Clayton, 1990)

Negara	Jenis Palu	Jenis Mekanisme	Koreksi
Argentina	<i>Donut</i>	<i>Cathead</i>	0,45
Brazil	<i>Pin weight</i>	<i>Hand dropped</i>	0,72
	<i>Automatic</i>	<i>Trip</i>	0,60
China	<i>Donut</i>	<i>Hand dropped</i>	0,55
	<i>Donut</i>	<i>Cathead</i>	0,50
Colombia	<i>Donut</i>	<i>Cathead</i>	0,50
	<i>Donut</i>	<i>Tombi trigger</i>	0,78 – 0,85
Japan	<i>Donut</i>	<i>Cathead 2 turns + Special release</i>	0,65 – 0,67
	<i>Automatic</i>	<i>Trip</i>	0,73
UK	<i>Safety</i>	<i>2 turns on cathead</i>	0,55 -0,60
USA	<i>Donut</i>	<i>2 turns on cathead</i>	0,45
Venezuela	<i>Donut</i>	<i>Cathead</i>	0,43

Adapun untuk mengetahui nilai C_b , C_s , dan C_r dapat dilihat pada Tabel 2.2

Tabel 2.2 Nilai C_b , C_s , dan C_r (SNI 4153-2008)

Faktor	Spesifikasi	Koreksi
Diameter bor (C_b)	65 mm – 115 mm	1,00
	150 mm	1,05
	200 mm	1,15
Jenis Palu (C_E)	Palu donat (<i>donut hammer</i>)	0,5 s.d 1,0
	Palu pengaman (<i>safety hammer</i>)	0,7 s.d 1,2
	Palu otomatis (<i>automatic trip</i>)	0,8 s.d 1,3
Pengambilan contoh (C_s)	Tabung standar	1,00
	Tabung standar tanpa pelapis	1,20
Panjang batang (C_r)	3 m – 4 m	0,75
	4 m – 6 m	0,85
	6 m – 10 m	0,95
	> 10 m	1,00

2.4. Pondasi Tiang Bor

Pondasi merupakan konstruksi untuk mendukung bangunan seperti gedung, jembatan, terowongan dan sebagainya. Pondasi merupakan konstruksi yang digunakan sebagai penopang bangunan dan meneruskan beban dari struktur atas ke lapisan tanah yang memiliki nilai daya dukung yang cukup kuat untuk menopang beban tersebut. Pondasi bangunan biasanya dibagi menjadi 2 bagian yaitu pondasi dangkal dan pondasi dalam. Pondasi dangkal dan pondasi dalam diklasifikasikan berdasarkan letak tanah keras dan perbandingan kedalaman dan lebar pondasi. Kedalaman pondasi dangkal yaitu kurang atau sama dengan lebar dari pondasi dan digunakan jika tanah keras berada dekat dengan permukaan tanah, sebaliknya pondasi dalam digunakan jika keberadaan tanah keras berada jauh dengan permukaan tanah keras (Ismail, 2014).

Pondasi tiang bor (*bored pile*) adalah pondasi tiang yang dalam pemasangannya dilakukan pengeboran tanah sesuai dengan kedalaman yang direncanakan terlebih dahulu. Pondasi tiang bor biasa digunakan pada tanah yang satbil dan kaku, saat pengeboran diperlukan *casing* sebagai alat bantu untuk pengeboran agar tidak terjadi kelongsoran pada lubang ketika tanah dengan keadaan berair, *casing* akan dilepas atau dikeluarkan ketika pengecoran beton dilakukan. Jenis pondasi tiang bor antara lain *bore pile* lurus untuk tanah keras, *bore pile* yang ujungnya diperbesar berbentuk bel, *bore pile* yang ujungnya diperbesar membentuk trapesium dan *bore pile* lurus untuk tanah berbatu. Pada dasarnya setiap pondasi memiliki kerugian dan keuntungan tersendiri pada saat pemakaiannya, adapun kerugian dan keuntungan pondasi tiang bor (*bored pile*) adalah sebagai berikut (Fadliansyah, 2011) :

a. Kerugian

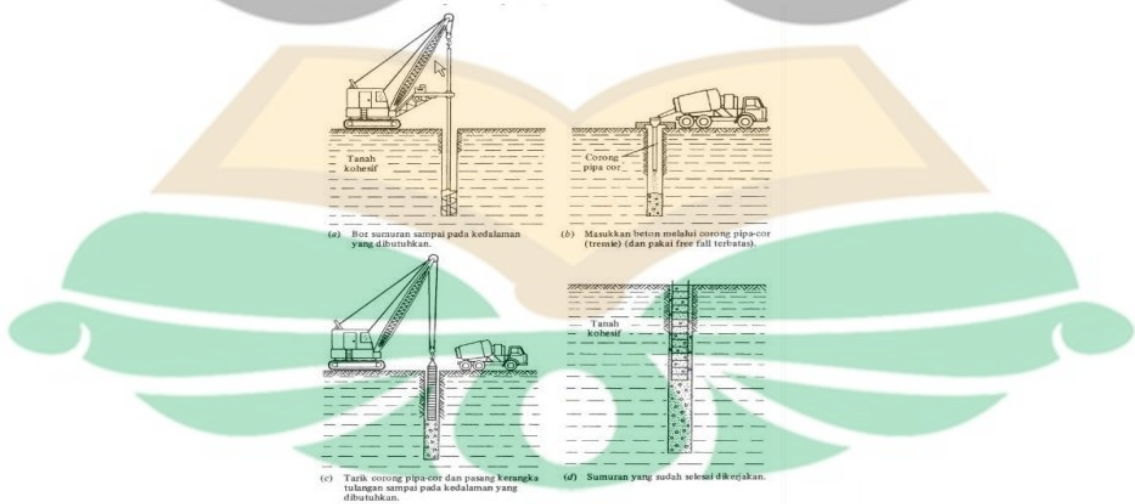
1. Karena metode yang dilakukan yaitu pengeboran lalu pengecoran, ketika sewaktu waktu dilakukan perubahan tiang bor sulit untuk diperpanjang diatas permukaan tanah.
2. Ketika dilakukan pengeboran tanah yang terdapat disekitar tiang bor bisa aja melemah akibat proses pengeboran.
3. Saat pengecoran, mutu beton yang tercampur dengan air tanah akan berpengaruh terhadap daya dukung tiang bor.

4. Pengecoran bergantung kepada cuaca.
- b. Keuntungan
1. Kedalaman tiang bor dapat dibuat bervariasi.
 2. Pada pemasangannya tiang bor tidak memiliki suara yang bising dan getaran yang kuat sehingga tiang bor tidak mengganggu kondisi lingkungan masyarakat sekitar proyek.
 3. Pada pengeboran tiang bor ketika terdapat batuan digunakan mata bor *auger* sehingga lubang yang di bor dapat menembus kedalaman yang sudah direncanakan.
 4. Perlakuan kepada tiang bor dapat disesuaikan dengan hasil pengujian yang sebelumnya telah dilakukan.

Faktor yang menjadi pertimbangan dalam pemilihan jenis pondasi adalah faktor biaya dan kendala apa saja yang dapat menghambat pekerjaan. Pondasi tiang bor pada pelaksanaannya dapat mengakibatkan perbedaan perilaku di bawah pembebanan sehingga pondasi tiang bor memiliki karakteristik khusus. Pada pengerjaan tiang bor terdapat 2 metode yang dilakukan berdasarkan cara pengerjaan, metode-metode tersebut adalah sebagai berikut:

1. Metode Kering

Pada pelaksanaan pondasi tiang bor menggunakan metode kering pertama lubang digali dan dasarnya dibentuk lonceng jika diperlukan. Setelah itu lubang diisi dengan beton segar dan tulangan dipasang.



Gambar 2.3 Metode kering pelaksanaan pondasi tiang bor (Fadliansyah, 2011)

2. Metode Basah

Pada metode basah setelah dilakukan pengeboran digunakan bantuan dari campuran semen *bentonite* dengan air untuk membantu proses pengeboran dan pengecoran agar tidak terjadi kelongsoran. Pada saat pengecoran dinding lubang tiang bor dilindungi menggunakan *casing* dan pengecoran dilakukan menggunakan bantuan pipa tremie. Beton segar yang dituangkan kedalam lubang akan menekan cairan semen *bentonite* sehingga cairan semen *bentonite* akan terdorong keluar.

2.5. Pengujian Tiang Bor dengan *Pile Driving Analyzer* (PDA)

Pile Driving Analyzer (PDA) adalah pengujian tiang yang dilakukan dengan cara memasang 2 sensor secara berlawanan. Sensor yang dipasang dapat mengukur regangan dan percepatan tiang (Teddy, 2012). Pengujian *pile driving analyzer* (PDA) memberikan masukkan-masukkan terkait dengan hubungan antara tanah dan pondasi tiang bor yang ada didalam tanah. Hasil yang didapatkan dari pengujian *pile driving analyzer* (PDA) adalah nilai kapasitas dukung tiang. Cara melakukan pengujian *pile driving analyzer* (PDA) adalah dengan menjatuhkan *hammer* dengan massa seberat 6 ton ke kepala tiang bor untuk selanjutnya terbentuk gelombang yang akan diubah dan direkam serta diproses menggunakan *pile driving analyzer* (PDA). Pekerjaan-pekerjaan yang harus diselesaikan terlebih dahulu sebelum dilakukannya pengujian PDA yaitu:

1. Pengecoran lubang tiang bor yang akan dilakukan pengujian
2. Nomor tiang yang akan diuji telah ditentukan.
3. Berat *hammer* yang akan digunakan.
4. Tinggi jatuh *hammer*.

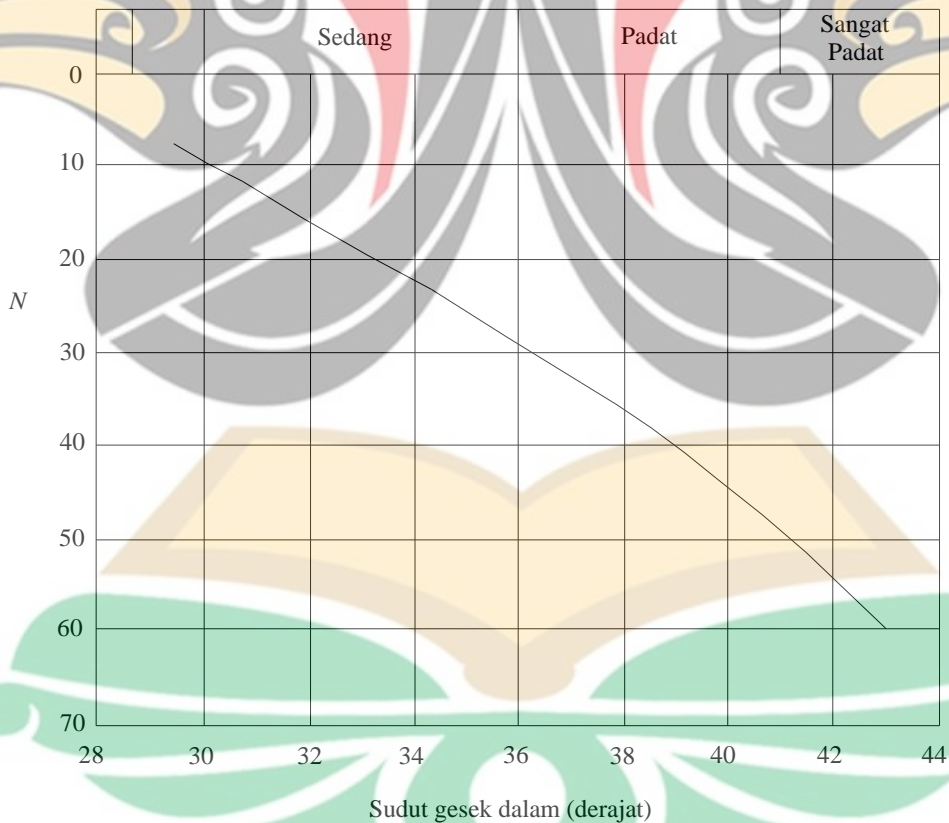
Tiang bor yang akan diuji diberikan tumbukan sampai hasil dari tumbukan telah terbaca dengan baik oleh komputer, jika hasil tidak terbaca dengan baik maka kelurusan tiang perlu diperiksa. Setelah dilakukan pengujian, hasil diproses menggunakan program bantu CAPWAP untuk mendapatkan nilai kapasitas dukung tiang bor.

2.6. Analisis Kapasitas Dukung Tiang Bor

Kapasitas dukung pondasi adalah kekuatan suatu pondasi untuk menahan beban yang bekerja yang disalurkan dari struktur bangunan yang terletak diatas pondasi. Kapasitas dukung pondasi ditinjau secara tunggal. Pada jenis tanah granuler contoh tanah tak terganggu sulit didapatkan sehingga diperlukan tes lapangan yaitu SPT untuk mendapatkan nilai sudut gesek dalam (ϕ). Metode untuk menghitung kapasitas dukung telah berkembang seiring berkembangnya zaman. Adapun metode yang digunakan untuk menghitung kapasitas dukung tiang bor adalah sebagai berikut :

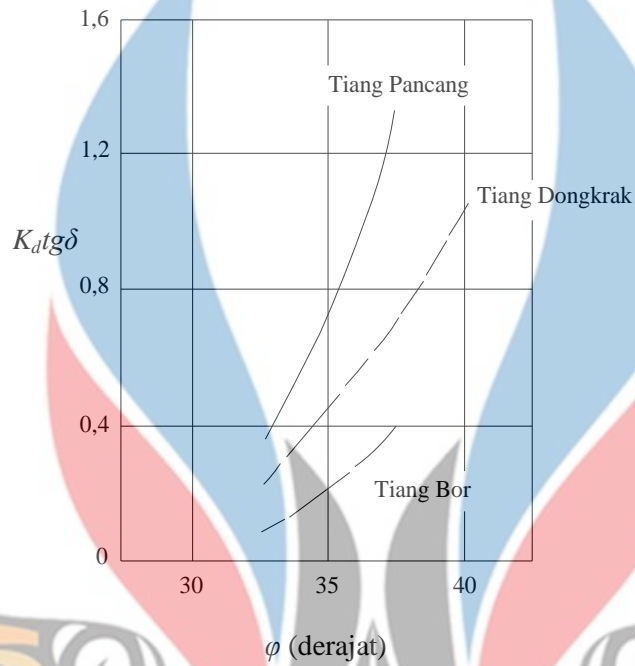
2.6.1. Metode Poulos dan Davis (1980)

Metode Poulos dan Davis (1980) mengestimasi nilai tahanan ujung maksimum yang mengacu pada saran Vesic 1967. Sebelum mencari nilai tahanan ujung ultimit diperlukan untuk mengetahui nilai ϕ' yang dapat diketahui dengan menggunakan Gambar 2.4.



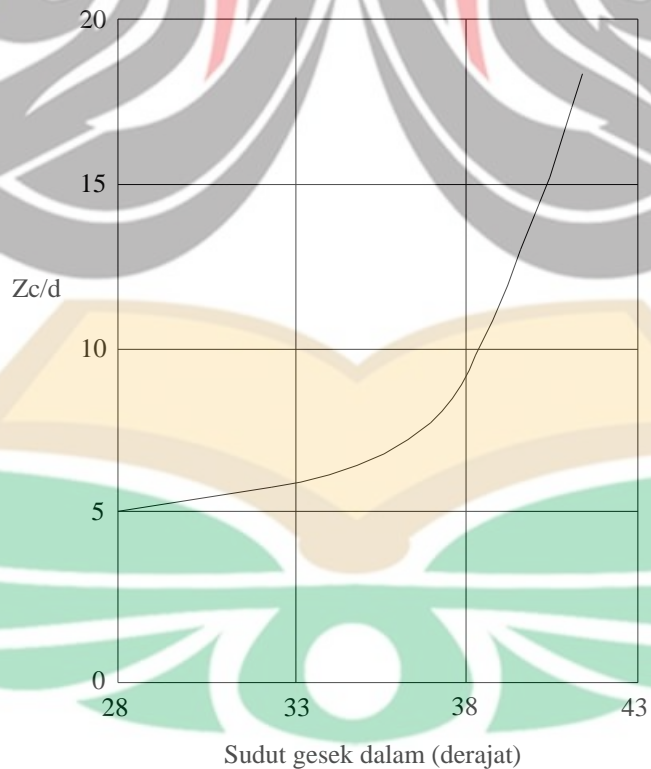
Gambar 2.4 Hubungan ϕ' dan N -SPT (Hardiyatmo, 2015)

Setelah nilai ϕ diketahui dapat dicari nilai $K_{dtg\delta}$ dengan menggunakan Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Hubungan $K_{dtg\delta}$ terhadap ϕ' (Hardiyatmo, 2015)

Setelah itu kedalaman kritis dapat ditentukan dengan menggunakan Gambar 2.6



Gambar 2.6 Hubungan Z_c terhadap ϕ (Hardiyatmo, 2015)

Setelah mengetahui semua nilai yang dibutuhkan untuk melanjutkan analisis perlu diketahui nilai tekanan *overburden*, nilai tekanan *overburden* dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$\text{Tekanan } overburden : P_o' = (h \times \gamma_b) + (Z_c - h) \times (\gamma_{sat} - \gamma_w) \quad (2.2)$$

Dimana :

- P_o' = Tekanan *overburden* (kN/m²)
- h = Tinggi tiang diatas kedalaman kritis (m)
- Z_c = Kedalaman kritis (m)
- γ_b = Berat volume basah (kN/m³)
- γ_{sat} = Berat volume tanah tak jenuh air (kN/m³)
- γ_w = Berat volume air (kN/m³)

Poulos dan Davis (1980) memberi saran terhadap variasi bentuk distribusi tegangan vertikal efektif dan kedalaman. Sebelum mencari nilai tahanan ujung ultimit diperlukan untuk mencari nilai A_b atau luas permukaan tiang.

$$\text{Luas permukaan tiang} : A_b = 0,25 \times \pi \times d^2 \quad (2.3)$$

Dimana :

- A_b = Luas permukaan tiang (m²)
- d = Diameter tiang (m)

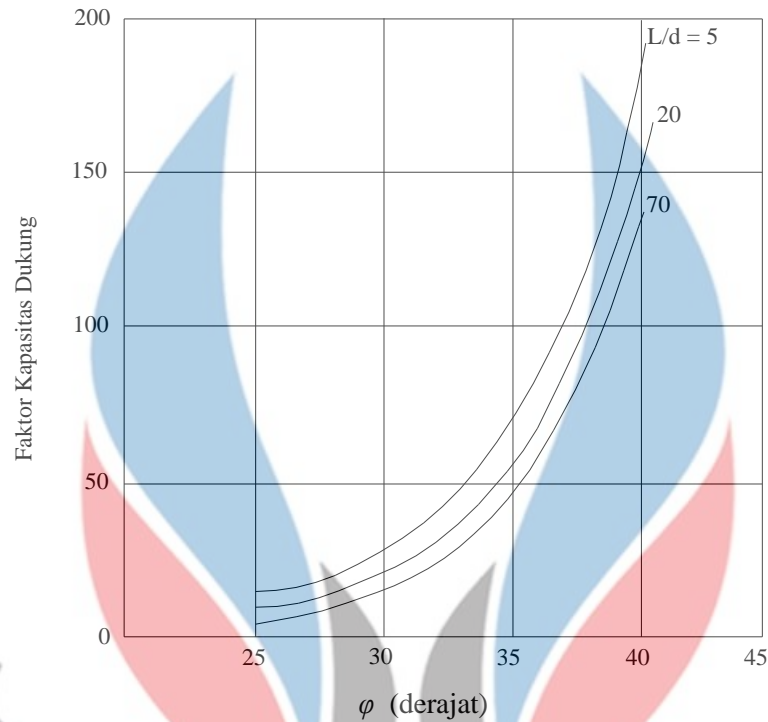
Tahanan ujung ultimit dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Tahanan ujung ultimit} : Q_b = A_b \times P_b' \times N_q \quad (2.4)$$

Dimana :

- Q_b = Tahanan ujung ultimit (kN)
- A_b = Luas penampang ujung tiang (m²)
- P_b' = Tekanan *overburden* efektif (kN/m²)

Nilai N_q dapat dilihat pada Gambar 2.7 berdasarkan usulan dari Berezantsev, 1961.



Gambar 2.7 Hubungan Nq dan ϕ (Hardiyatmo, 2015)

Setelah itu cek terhadap nilai batasan tahanan ujung satuan maksimum dengan menggunakan persamaan :

$$\text{Tahanan ujung satuan} : f_b = Q_b \times A_b \quad (2.5)$$

Dimana :

Q_b = Tahanan ujung ultimit (kN)

A_b = Luas penampang ujung tiang (m^2)

Metode Poulos dan Davis (1980) menyarankan sebelum mencari nilai tahanan gesek ultimit diperlukan mencari nilai keliling tiang dengan menggunakan persamaan :

$$\text{Keliling tiang} : A_s = \pi \times d \quad (2.6)$$

Dimana :

A_s = Keliling tiang (m)

d = Diameter tiang (m)

Tahanan gesek ultimit tiang dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$\text{Tahanan gesek ultimit} : Q_s = \sum A_s \times K_d \times \tan \delta \times \bar{P}_0' \quad (2.7)$$

Dimana :

- Q_s = Tahanan gesek ultimit (kN)
- A_s = Keliling tiang (m)
- \bar{P}_o' = Tekanan *overburden* rata-rata (kN/m²)

Setelah itu cek terhadap nilai batasan tahanan gesek satuan maksimum dengan menggunakan persamaan :

$$\text{Tahanan gesek satuan} : f_s = K_d \text{tg} \delta' \times P_o' \quad (2.8)$$

Dimana :

- f_s = Tahanan gesek satuan (kN/m²)
- P_o' = Tekanan *overburden* (kN/m²)

Untuk mencari nilai berat tiang dapat digunakan persamaan :

$$\text{Berat tiang} : W_p = 0,25 \times \pi \times d^2 \times \gamma_{\text{beton}} \quad (2.9)$$

Dimana :

- W_p = Berat tiang (kN)
- d = Diameter tiang (m)

Nilai kapasitas dukung ultimit harus dikurangi dengan nilai W_p dikarenakan untuk tiang yang di cor ditempat atau tiang bor memiliki berat sendiri tiang yang cukup besar nilainya, sedangkan untuk tiang pracetak berat sendiri tiang dapat diabaikan (Sasrodarsono,2000). Nilai kapasitas dukung ultimit dapat dicari besaran nilainya menggunakan persamaan :

$$\text{Kapasitas dukung ultimit} : Q_u = Q_b + Q_s - W_p \quad (2.10)$$

Dimana :

- Q_b = Tahanan ujung ultimit (kN)
- Q_s = Tahanan gesek ultimit (kN)
- W_p = Berat tiang (kN)

2.6.2. Metode Kulhawy (1983)

Metode Kulhawy (1983) dikembangkan dari teori terdahulu yaitu teori Vesic (1977) dengan mengevaluasi tahanan ujung tiang dengan mempertahankan indeks kekakuan atau *rigidity index* tanah yang dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan:

$$\text{Indeks kekakuan} : I_r = \frac{E}{2(1 + \mu) \times P_b' \times \text{tg } \phi} \quad (2.11)$$

Dimana :

- I_r = Indeks kekakuan
- E = Modulus elastis tanah (kN/m²)
- μ = Rasio poisson tanah
- P_b' = Tegangan vertikal efektif pada elevasi dasar tiang (kN/m²)
- ϕ = Sudut gesek dalam tanah (°)

Nilai Indeks kekakuan dapat ditentukan dengan menggunakan Tabel 2.3

Tabel 2.3 Indeks Kekakuan Tanah (Bowles, 1997)

Jenis Tanah	Modulus Elastis Tanah		Nisbah Poisson
	MN/m ²	lb/in ²	
Pasir lepas	10,35 – 24,15	1500 – 3500	0,20 – 0,40
Pasir medium	17,25 – 27,60	2500 – 4000	0,25 – 0,40
Pasir padat	34,50 – 55,20	5000 – 8000	0,30 – 0,40
Pasir kelanauan	10,35 – 17,25	1500 – 2500	0,20 – 0,40
Pasir dan kerikil	69,00 – 172,50	10000 – 25000	0,15 – 0,40
Lempung lunak	2,07 – 25,18	300 – 750	
Lempung medium	5,18 – 10,35	750 – 1500	0,20 – 0,50
Lempung kaku	10,35 – 24,15	1500 - 3500	

Sebelum mencari nilai indeks kekakuan diperlukan nilai tekanan *overburden* efektif pada elevasi dasar tiang yang dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan:

$$\text{tekanan } overburden \text{ efektif} : P_b' = (h \times \gamma_b) + (H - h) \times (\gamma_{sat} - \gamma_w) \quad (2.12)$$

Dimana :

- P_b' = tekanan *overburden* efektif (kN/m²)

h = Tinggi tiang diatas muka air tanah (m)

H = Kedalaman tiang (m)

γ_b = Berat volume basah (kN/m^3)

γ_{sat} = Berat volume tanah tak jenuh air (kN/m^3)

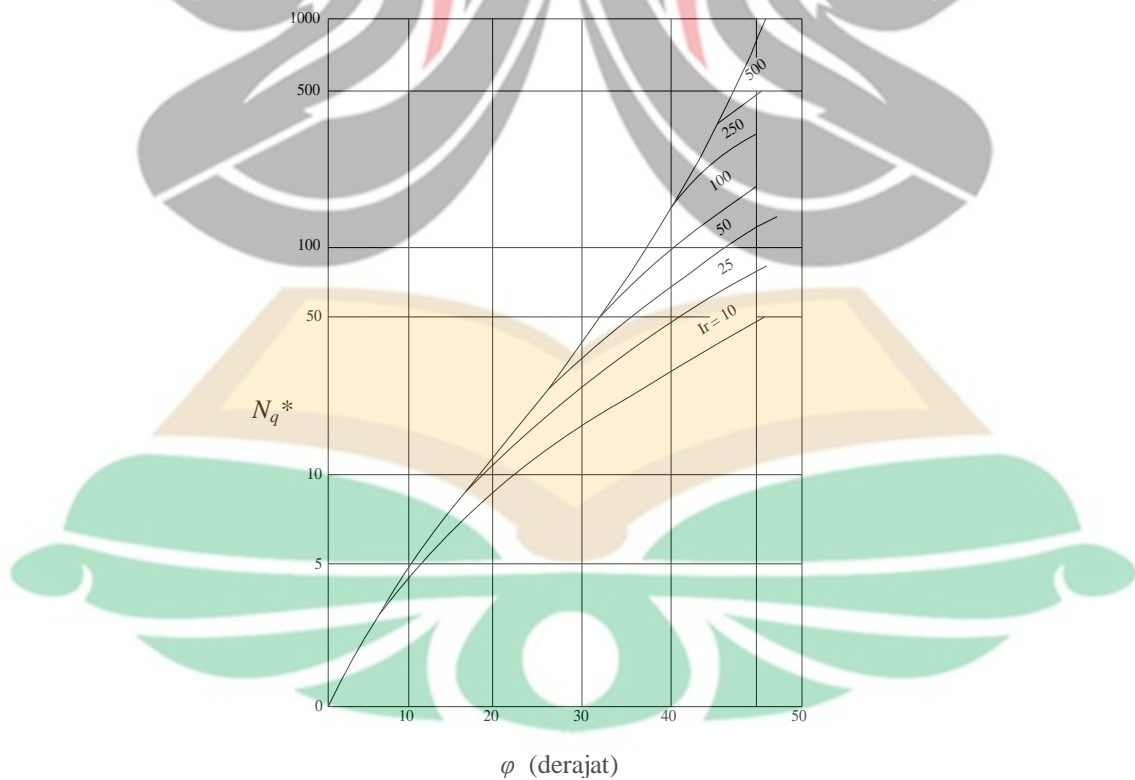
γ_w = Berat volume air (kN/m^3)

Untuk nilai rasio poisson tanah dapat dilihat pada Tabel 2.3

Tabel 2.4 Nilai Rasio Poisson (Hardiyatmo, 2015)

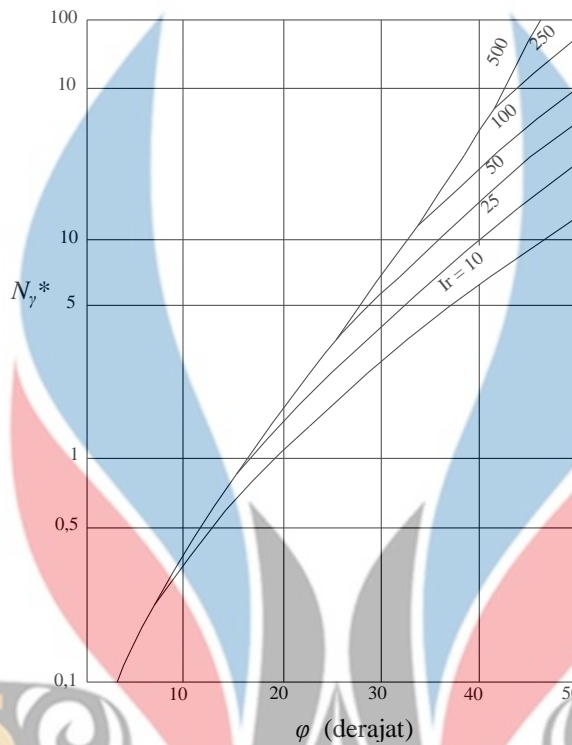
Tanah atau batu	Raiso poisson (φ)
Lempung jenuh, kondisi <i>undrained</i>	0,50
Lempung tidak jenuh	0,30 – 0,40
Pasir padat kondisi terdrainase	0,30 – 0,40
Pasir longgar kondisi terdrainase	0,10 – 0,30
Batu pasir	0,25 – 0,30
Granit	0,23 – 0,27

Setelah mengetahui nilai indeks kekakuan, nilai tersebut digunakan untuk mencari nilai faktor kapasitas dukung yaitu nilai N_q^* dan N_γ^* , Faktor kapasitas dukung N_q^* dapat dinyatakan dengan melihat Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Faktor kapasitas dukung N_q^* (Hardiyatmo, 2015)

Faktor kapasitas dukung N_γ^* dapat dinyatakan dengan melihat Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Faktor kapasitas dukung N_γ^* (Hardiyatmo, 2015)

Setelah mendapatkan nilai faktor kapasitas dukung dapat dinyatakan nilai tahanan ujung ultimit dengan mencari nilai tahanan ujung satuan terlebih dahulu menggunakan persamaan:

$$\text{Tahanan ujung satuan} : f_b = d \times \gamma' N_\gamma^* \times P_b' N_q^* \quad (2.13)$$

Dimana :

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

d = Diameter tiang (m)

γ' = Berat volume tanah (kN/m^3)

N_γ^* = Faktor kapasitas dukung

N_q^* = Faktor kapasitas dukung

Setelah mengetahui nilai tahanan ujung satuan dapat dinyatakan nilai tahanan ujung ultimit dengan menggunakan persamaan:

$$\text{Tahanan ujung ultimit} : Q_b = f_b \times A_b \quad (2.14)$$

Dimana :

- Q_b = Tahanan ujung ultimit (kN)
- A_b = Luas penampang ujung tiang (m^2)
- f_b = Tahanan ujung satuan (kN/m^2)

Selain nilai tahanan ujung ultimit, untuk mencari nilai kapasitas dukung tiang perlu untuk mengetahui nilai tahanan gesek satuan dan selanjutnya perlu diketahui nilai tahanan gesek ultimit. Sebelum mengetahui kedua nilai tersebut ada beberapa nilai yang harus diketahui terlebih dahulu yaitu nilai koefisien tekanan (K_o), koefisien beta (β), dan nilai tekana *overburden* efektif rata-rata. Nilai koefisien tekanan lateral tanah (K_o) dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan :

$$\text{Koefisien tekanan tanah} : K_o = (1 - \sin \varphi') OCR^{\sin \varphi'} \quad (2.15)$$

Dimana :

- K_o = Koefisien tekanan tanah
- φ' = Sudut gesek dalam efektif ($^\circ$)
- OCR = *Over consolidated ratio* (rasio konsolidasi berlebihan)

Selain nilai koefisien tekanan tanah diperlukan untuk mengetahui nilai koefisien β yang dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan:

$$\text{Koefisien beta} : \beta = K_o \left(\frac{K_d}{K_o} \right) \tan \varphi' \left(\frac{\delta}{\varphi'} \right) \quad (2.16)$$

Dimana :

- B = Koefisien
- K_o = Koefisien tekanan tanah
- K_d/K_o = Rasio tipe fondasi dan metode pelaksanaan
- φ' = Sudut gesek dalam efektif ($^\circ$)
- δ/φ' = Gesekan antara tanah dan bahan tiang

Nilai K_d/K_o dapat ditentukan dengan menggunakan Tabel 2.4

Tabel 2.5 Rasio K_d/K_o (Hardiyatmo, 2015)

Tipe fondasi dan metode pelaksanaan	K_d/K_o
Tiang – semprot (<i>jetted</i>)	0,5 – 0,7
Tiang – perpindahan kecil, pancang	0,7 – 1,2
Tiang – perpindahan besar, pancang	1,0 – 2,0
Tiang bor (<i>drilled shift</i>) – dibangun dengan metode kering dengan gangguan dinding samping kecil dan pengecoran cepat	0,9 – 1,0
Tiang bor – dengan metode cair dengan kecakapan kerja tinggi	0,9 – 1,0
Tiang bor – dengan metode cair dengan kecakapan kerja rendah	0,6 – 0,7
Tiang bor – metode pipa selubung di bawah muka air	0,7 – 0,9

Nilai δ/ϕ' dapat ditentukan dengan menggunakan Tabel 2.5

Tabel 2.6 Nilai δ/ϕ' (Hardiyatmo, 2015)

Gesekan anatar tanah dan bahan tiang	δ/ϕ'
Pasir dengan beton kasar (beton cetak di tempat)	1
Pasir dengan beton halus (beton pracetak)	0,8 – 1,0
Pasir dengan baja kasar (baja kasar, meruncing)	0,7 – 0,9
Pasir dengan baja halus (profil H atau pipa bulat)	0,7 – 0,5
Pasir dengan kayu	0,8 – 0,9
Tiang bor dibangun dengan metode kering atau dengan pipa selubung sementara dan pelaksanaan bagus	1
Tiang bor dibangun dengan metode cair	0,8 – 1,0

Setelah mengetahui nilai koefisien beta diperlukan untuk mengetahui nilai tekanan *overburden* efektif rata-rata dengan menggunakan persamaan:

$$\text{Tekanan } \textit{overburden} \text{ rata-rata: } P_o' = 0,5(h \times \gamma_b) + (H - h) \times (\gamma_{sat} - \gamma_w) \quad (2.17)$$

Dimana :

P_o' = Tekanan *overburden* efektif rata-rata (kN/m^2)

H = Tinggi tiang diatas muka air tanah (m)

H = Kedalaman tiang (m)

γ_b = Berat volume basah (kN/m^3)

γ_{sat} = Berat volume tanah tak jenuh air (kN/m^3)

γ_w = Berat volume air (kN/m^3)

Tahanan gesek satuan tiang bor untuk metode Kulhawy dinyatakan oleh :

$$\text{Tahanan gesek satuan} : f_s = \beta \times P_o' \quad (2.18)$$

Dimana :

- f_s = Tahanan gesek satuan (kN/m^2)
- P_o' = Tekanan *overburden* efektif rata-rata (kN/m^2)
- β = Koefisien

Tahanan gesek ultimit tiang bor untuk metode Kulhawy dinyatakan oleh :

$$\text{Tahanan gesek ultimit} : Q_s = A_s \times f_s \quad (2.19)$$

Dimana :

- Q_s = Tahanan gesek ultimit (kN)
- f_s = Tahanan gesek satuan (kN/m^2)
- A_s = Keliling tiang (m)

Nilai koefisien (β) dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Koefisien} : \beta = Ktg\delta \quad (2.20)$$

Dimana :

- K = Proses pelaksanaan mengurangi tegangan lateral dalam tanah
- δ = Sudut gesek antara tanah dan tiang bor

Menurut Sasrodarsono (2000) untuk tiang dengan berat sendiri yang cukup besar seperti tiang yang di cor ditempat nilai kapasitas dukung harus dikurangi dengan nilai berat tiang. Kapasitas dukung ultimit dapat dicari besaran nilainya menggunakan persamaan :

$$\text{Kapasitas dukung ultimit} : Q_u = Q_b + Q_s - W_p \quad (2.21)$$

Dimana :

- Q_b = Tahanan ujung ultimit (kN)
- Q_s = Tahanan gesek ultimit (kN)
- W_p = Berat tiang (kN)

2.6.3. Kapasitas Ijin Tiang

Kapasitas ijin tiang didapatkan dari nilai kapasitas ultimit tiang dibagi dengan faktor aman tertentu. Faktor aman untuk tiang bor bergantung pada nilai kondisi tanah serta ketelitian ketika dilakukan penyelidikan tanah. Fungsi faktor aman adalah sebagai berikut (Hardiyatmo, 2015) :

1. Memastikan bahwa bahan yang digunakan dalam pembuatan tiang aman untuk mendukung beban yang bekerja.
2. Memastikan nilai penurunan total tiang tunggal maupun tiang kelompok masih dibatas toleransi.
3. Memberikan keamanan dari ketidakpastian nilai kuat geser dan kompresibilitas lapisan tanah.
4. Mengantisipasi nilai ketidakpastian yang timbul dari metode perhitungan yang digunakan.

Menurut Hardiyatmo (2015) nilai faktor aman untuk tiang bor tanpa ada pembesaran di bagian bawah tiang nilai faktor amannya sebesar 2. Sedangkan untuk tiang bor dengan dasar yang dibesarkan memiliki faktor aman sebesar 2,5. Nilai kapsitas dukung ijin tiang dapat dicari menggunakan persamaan berikut :

$$\text{Kapasitas ijin tiang} : Q_a = \frac{Q_u}{SF} \quad (2.22)$$

Dimana :

Q_a = Kapasitas ijin tiang (kN)

SF = Faktor aman

2.7. *Plaxis 2D*

Plaxis (Finite Element Code for Soil and Rock Analysis) adalah program yang digunakan untuk menganalisis geoteknik untuk dapat mengetahui perilaku mendekati kejadian sebenarnya. Pada program *plaxis* terdapat banyak fitur untuk menganalisa seperti analisa kestabilan kontruksi, faktor aman (*safety factor*), dan deformasi (Brinkgreve, 2004). Parameter tanah yang digunakan dalam program *plaxis* yaitu :

1. Berat volume tanah kering
2. Berat volume tanah basah

3. Permeabilitas arah horizontal
4. Permeabilitas arah vertikal
5. Modulus young
6. Poisson ratio
7. Kohesi
8. Sudut gesek
9. Sudut dilatasi

Program *plaxis* dapat digunakan dalam menganalisis konstruksi dinding penahan tanah, timbunan dan terowongan. Oleh karena itu digunakan program *plaxis* untuk memodelkan dan menganalisis kapasitas dukung tiang yang telah dianalisis sebelumnya menggunakan metode konvensional. Kapasitas dukung tiang yang dapat ditentukan dengan menggunakan hasil dari pemodelan menggunakan program bantu *plaxis* yang memiliki keluaran atau *output* berupa nilai faktor aman ($\sum -Msf$) sehingga nilai kapasitas dukung tiang dengan menggunakan program *plaxis* yaitu sebagai berikut :

$$\text{Kapasitas Dukung tiang : } Q_u = Q_a \times \sum -Msf \quad (2.23)$$

Dimana :

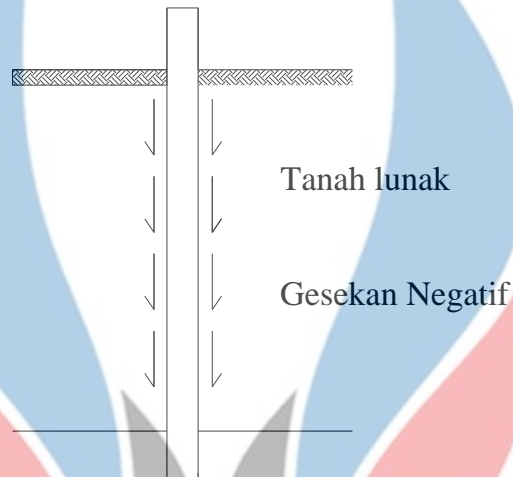
Q_{all} = Kapasitas dukung ijin tiang (kN)

$\sum -Msf$ = Faktor aman *plaxis*

2.8. Negative Skin Friction

Negative skin friction adalah keadaan dimana saat urugan tanah ditambahkan di atas tanah kompresif maka akan terjadi konsolidasi atau penurunan pada bagian kompresif tersebut. Pondasi yang dipancang pada atau melewati daerah kompresif sebelum atau setelah pengurangan sebelum konsolidasi selesai akan mengalami dampak akibat tanah yang masih mengalami penurunan. Pergerakan ini akan membentuk *skin friction* antara tiang dan tanah. *Negative skin friction* terjadi pada tanah yang bersifat kompresif yaitu tanah lunak (lempung dan lanau), karena pada tanah lunak terdapat peningkatan tekanan pada permukaan tanah yang dapat menyebabkan penurunan pada tanah atau konsolidasi (Bowles, 1997). Ada beberapa kondisi yang memungkinkan *negative skin friction* terjadi, yaitu :

1. Urugan tak berkohesi yang ditempatkan di endapan kohesif yang kompresibel (sifat mudah mampat).
2. Menurunkan muka air tanah dari penurunan tambang tanah yang dihasilkan.



Gambar 2.10 Tiang dipengaruhi gaya gesek pada sisi tiang (Hardiyatmo, 2015)

2.9. Posisi Penelitian

Penelitian terdahulu merupakan rangkuman dari hasil penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan dengan penelitian tugas akhir yang sedang dilakukan yang ditunjukkan dalam Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Penelitian Terdahulu (Penulis, 2020)

No.	Nama dan Tahun Publikasi	Hasil
1.	Fadliansyah, 2011	Judul : Analisis Daya Dukung Pondasi <i>Bore Pile</i> pada Proyek Pembangunan Hotel Santika Jalan Pengadilan Medan Hasil : Didapatkan nilai kapasitas dukung tiang tunggal dan tiang kelompok berdasarkan hasil pengujian di lapangan.
2.	Jusi, 2015	Judul : Analisa Kuat Dukung Pondasi <i>Bored Pile</i> Berdasarkan Data Pengujian Lapangan (<i>Cone</i> dan <i>Standard Penetration Test</i>) Hasil : Kapasitas dukung metode Schertmann dan Nottingham optimis 6,24% (CPT) dan metode O'Neill Reese memiliki SF yang lebih kecil (SPT)

No.	Nama dan Tahun Publikasi	Hasil
3.	Djarwanti, N., H.I, R. D., & Maharani, G. (2015)	Judul : Komparasi Nilai Daya Dukung Tiang Tunggal Pondasi Bor Menggunakan data SPT, dan Hasil <i>Loading Test</i> pada Tanah Granuler Hasil : Metode Poulos dan Davis (1980) lebih tepat digunakan karena nilai Q_u yang dihasilkan lebih kecil dari interpretasi data <i>loading test</i> .
4.	Jusi, U., Maizir, H., & Gultom, J.H. (2017)	Judul : Evaluasi Data Uji Lapangan dan Laboratorium terhadap Daya Dukung Pondasi Tiang Bor Hasil : Didapatkan nilai kapasitas dukung berdasarkan data pengujian lapangan lebih tinggi daripada nilai kapasitas dukung menggunakan data laboratorium
5.	Khomsianti, N. L., Jirna, I. W., & Setyawan, E. (2019)	Judul : Perbandingan Daya Dukung Aksial Pondasi Tiang Bor Tunggal Menggunakan Data <i>Standard Penetration Test</i> (SPT) dan <i>Pile Driving Analyzer</i> (PDA) Test pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Pandaan Malang Hasil : Didapatkan hasil nilai kapasitas dukung yang dianalisis dengan metode statis mendekati nilai dari pengujian PDA salah satu metode yang digunakan yaitu metode Poulos dan Davis (1980), tetapi disarankan untuk membandingkan dengan data lainnya yaitu data parameter tanah seperti nilai kohesi tanah (c) dan sudut gesek dalam tanah (ϕ) agar nilai kapasitas dukung yang telah dianalisis dapat dibandingkan dengan data pengujian lain

Penelitian ini bukan merupakan penelitian yang pertama kali dilakukan, untuk mengetahui perbandingan dari penelitian ini dengan penelitian sebelumnya dibuat tabel posisi penelitian yang dapat dilihat pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Posisi Penelitian (Penulis, 2020)

No.	Identitas Penelitian	Standard Penetration Test (SPT)	Uji Lab	Cone Penetrometer Test (CPT)	Pile Driving Analyzer (PDA)	Program Bantu <i>Plaxis</i>
1.	Fadliansyah, 2011	✓	✓	✓		
2.	Jusi, 2015	✓		✓		
3.	Djarwanti, N., H.I, R. D., & Maharani, G. (2015)	✓				
4.	Jusi, U., Maizir, H., Gultom, J.H. (2017)	✓	✓	✓		
5.	Khomsinati, N. L., Jirna, I. W., & Setyawan, E. (2019)	✓			✓	
6.	Letak Penelitian	✓	✓		✓	✓

Penelitian tugas akhir mengenai analisis kapasitas dukung tiang bor telah banyak dilakukan, akan tetapi terdapat perbedaan pada analisis nilai kapasitas dukung yang dilakukan. Analisis kapasitas dukung yang dilakukan oleh penulis menggunakan tambahan program bantu dan terdapat perbedaan pada lokasi tinjauan yang mana setiap lokasi memiliki karakteristik tanah yang berbeda.