

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan moda transportasi sangat dibutuhkan memfasilitasi arus perpindahan dan mobilisasi orang dan barang dengan cepat, teratur, aman, nyaman, dan efisien. Khususnya pembangunan prasarana transportasi di bidang perkeretaapian oleh Direktorat Jendral Perkeretaapian tidak hanya berfokus di daerah Pulau Jawa. Pembangunan sarana juga dilakukan di Pulau Sumatera khususnya di Sumatera Bagian Utara, dalam hal mendukung pergerakan masyarakat dari pusat Kota Medan menuju Kota Binjai, dan begitu sebaliknya. Ditjen Perkeretaapian sedang melaksanakan pembangunan jembatan layang KA (*Elevated Track*) relasi Stasiun Besar Medan–Stasiun Binjai.

Penentuan jenis pondasi yang digunakan harus disesuaikan dengan keadaan tanah di sekitar bangunan dan besar beban yang direncanakan. Adapun untuk beban yang besar, biasanya perencanaan memilih penggunaan pondasi dalam. Pondasi dalam digunakan pada umumnya adalah pondasi tiang pancang dan tiang bor (*bored pile*). Pembangunan *Elevated track* Medan-Binjai menggunakan pondasi *bored pile* sebagai pondasinya. Penggunaan jenis pondasi *bored pile* ini didasarkan pada keadaan daya dukung tanah jauh dari permukaan tanah serta keadaan sekitar lokasi bangunan yang terdapat rel Kereta Api yang masih difungsikan dan pemukiman warga di sekitar bangunan. Sehingga di khawatirkan dapat menimbulkan kerusakan pada rel dan bangunan yang dikibatkan oleh getaran-getaran dan kebisingan pada proses pemancangan apabila yang digunakan adalah pondasi tiang pancang. Sedangkan pondasi tiang pancang biasanya digunakan pada lokasi lahan kosong, dimana getaran-getaran yang ditimbulkan akibat proses pemancangan berlangsung tidak mengganggu lingkungan sekitarnya.

Pondasi adalah bagian dari suatu sistem struktur bangunan yang meneruskan beban pondasi dan berat struktur kedalam tanah dan batuan yang terletak dibawahnya. Secara umum permasalahan pondasi dalam lebih rumit daripada pondasi dangkal. Perhitungan daya dukung pondasi *bored pile* ditinjau dari daya dukung pondasi *bored pile* di ujung (*end bearing capacity*) yang di peroleh dari

tekanan di ujung tiang *bored pile* dan daya dukung geser atau selimut tiang (*Skin Friction capacity*) yang diperoleh dari daya dukung gesek atau gaya adhesi antara *bored pile* dan tanah sekelilingnya. *Bored pile* berinteraksi dengan tanah untuk menghasilkan daya dukung mampu memikul dan memberikan keamanan pada struktur atas (*superstructure*).

Beberapa faktor yang mempengaruhi daya dukung tanah yaitu nilai kohesi (c), sudut geser tanah (ϕ), berat isi (γ), baik itu berat isi kering (γ_{dry}) maupun berat isi jenuh (γ_{sat}), modulus young (E). Penentuan faktor dapat dilakukan dengan penyelidikan lapangan dengan dilanjutkan dengan besar parameter tanah dapat ditentukan dengan penyelidikan tanah lapangan seperti *Cone Penetration Test* (CPT), *Standart Penetration Test* (SPT), atau dilaboratorium dengan uji triaksial dan *direct shear*.

Dalam tugas akhir ini menguraikan tentang daya dukung pondasi dalam yakni *bored pile* dengan menggunakan metode analisis statis dan dinamis. Perhitungan daya dukung pada pondasi *bored pile* diketahui melalui pengujian dan dibandingkan dengan data penyelidikan tanah pada saat sebelum dilakukan pengerjaan pondasi. Hal ini dilakukan untuk mengetahui besar daya dukung pondasi *bored pile*. Maka perlu dilakukan Analisis Daya Dukung Pondasi Bore Pile Jembatan Layang Kereta Api Medan-Binjai Sta 2+450.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, maka dapat dirumuskan:

1. Menentukan besar daya dukung aksial pada tiang tunggal pada pondasi *bored pile* Jembatan Kereta Api Medan-Binjai berdasarkan nilai N_{60} .
2. Menentukan besar daya dukung tiang tunggal berdasarkan korelasi nilai N_{60} terhadap parameter tanah dan sondir.
3. Membandingkan besar daya dukung tiang tunggal berdasarkan hasil N_{60} , parameter tanah, dan sondir dengan hasil PDA test.
4. Bagaimana menentukan nilai efisiensi pondasi *bored pile* kelompok?
5. Bagaimana menentukan besar daya dukung kelompok tiang pada pondasi *bored pile*?

1.3 Batasan Masalah

Dalam pelaksanaan proyek pembangunan Jembatan Layang Kereta Api, hal yang dianalisis adalah daya dukung pondasi *bored pile*, oleh karena itu perlu membuat batasan masalah yang bertujuan untuk menghindari terjadinya keracuan tujuan penelitian ini.

Batasan masalah dalam penelitian adalah:

1. Lokasi dalam penelitian ini adalah Proyek Pembangunan Jembatan Layang Kereta Api Medan –Binjai Sta 2+450.
2. Data investigasi yaitu pengujian SPT (*Standart Penetrasi Test*) diambil pada lokasi penelitian.
3. Tidak merencanakan struktur bangunan atas jembatan layang.
4. Tidak menghitung penulangan abutmen dan pondasi.
5. Tidak menghitung beban luar yang bekerja pada pondasi, diantaranya seperti berat sendiri, beban lalu lintas, beban angin, dan beban gempa.
6. Tidak membahas tentang anggaran biaya.
7. Tidak melakukan analisis akibat beban gempa.
8. Titik/tiang yang ditinjau pada lokasi penelitian adalah titik P38.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang diatas, secara umum tujuan utama pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan perhitungan daya dukung pondasi *bored pile* berdasarkan penyelidikan tanah dengan data N_{60} .
2. Melakukan perhitungan daya dukung pondasi *bored pile* dengan metode statis berdasarkan nilai N_{60} yang di korelasikan dengan nilai parameter tanah dan sondir.
3. Membandingkan hasil perhitungan daya dukung tiang tunggal *bored pile* berdasarkan N_{60} , parameter tanah, dan sondir dengan hasil PDA Test.
4. Menghitung efisiensi kelompok pondasi *bored pile*.
5. Menghitung daya dukung kelompok pondasi *bored pile*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun mamfaat diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini kami harapkan dapat memberikan gambaran secara sistematis mengenai tentang pondasi tiang *bored pile*.
2. Memberikan pemahaman pengetahuan tentang pondasi tiang *bored pile*.
3. Memberikan gambaran mengenai korelasi N-SPT dengan parameter tanah dan pengujian data sondir.
4. Mengetahui perhitungan daya dukung pondasi dengan metode manual yaitu: metode Mayerhof, metode Vesic, metode Reese & Wright, dan metode lainnya.
5. Mengetahui keuntungan dan kerugian memnggunakan pondasi *bored pile*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Pondasi adalah suatu konstruksi bagian dasar bangunan (*substruktur*) yang berfungsi meneruskan beban dari struktur atas ke lapisan tanah bawahnya. Pondasi tiang (*pile*) adalah suatu bagian konstruksi pondasi yang berbentuk batang yang berfungsi untuk menyalurkan beban dari struktur atas ke tanah sekitar tiang pada kedalaman tertentu. Penyaluran beban oleh tiang ini dapat dilakukan melalui lekatan antara selimut tiang dengan tanah di sekitar tiang (*skin-friction*), dan daya dukung ujung tiang (*end-bearing*), beban yang diterima oleh tiang diteruskan oleh ujung tiang ke lapisan tanah keras (Das, 2011).

Dalam perencanaan pondasi bore diperlukan pemahaman tentang teori-teori perencanaan pondasi dalam. Dalam Bab ini membahas tentang teori-teori yang mendukung perencanaan pondasi dalam studi kasus pada tugas akhir ini. Perencanaan pondasi bore pile meliputi penentuan parameter-parameter tanah, perhitungan kapasitas daya dukung tiang yang diperlukan, perencanaan grup tiang, dan penurunan tiang (*settlement*).

Menurut (Hardiyatmo, 2011) hal yang perlu dihindari dalam perencanaan pondasi adalah keruntuhan geser atau deformasi berlebihan. Pada perencanaan pondasi juga harus memperhatikan hal-hal berikut:

1. Daya dukung pondasi harus lebih besar dari beban yang bekerja pada pondasi baik beban statik maupun beban dinamik.
2. Penurunan yang terjadi akibat pembebanan tidak lebih besar dari penurunan yang diijinkan dan penurunan yang tidak seragam (*differential settlement*) tidak mengakibatkan kerusakan pada struktur.

Menurut (Hardiyatmo, 2011), kapasitas daya dukung ultimet diperhitungkan pada kondisi keruntuhan jangka pendek atau kondisi tak terdrainase (*undrained*). Besar daya dukung tahanan ujung dan tahanan samping pada pondasi *bored pile* tergantung dari beberapa hal berikut:

1. Kondisi lapisan tanah dasar pendukung tempat bertumpu pondasi beserta parameter lapisan tanah. Parameter tanah di pengaruhi oleh faktor-faktor berikut ini.
 - Berat volume (γ)
 - Sudut geser dalam (ϕ)
 - Kohesi tanah (c)
2. Bentuk geometri pondasi yaitu: bentuk, dimensi, dan elevasi.
3. Beban pondasi.

2.2 Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah adalah suatu sistem pengaturan beberapa jenis tanah yang berbeda-beda tapi mempunyai sifat yang serupa kedalam kelompok-kelompok dan sub kelompok-sub kelompok berdasarkan pemakaiannya. Sistem klasifikasi memberikan suatu bahasa mudah menjelaskan secara singkat sifat-sifat umum tanah yang sangat bervariasi tanpa penjelasan terinci (Das B. M., 1995).

Tujuan klasifikasi tanah adalah untuk menentukan kesesuaian terhadap pemakaian tertentu, serta menginformasikan tentang keadaan tanah dari suatu daerah ke daerah lainnya dalam bentuk data dasar. Adapun dua cara klasifikasi yang umum digunakan yaitu:

2.2.1 Sistem Klasifikasi AASHTO

Pada sistem klasifikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transport Officials*), tanah diklasifikasi kedalam tujuh (7) kelompok besar, yaitu A-1 sampai dengan A-7. Tanah yang diklasifikasikan kedalam A-1, A-2, dan A-3 adalah tanah berbutir dimana 35% atau kurang dari jumlah butiran tanah tersebut lolos ayakan No.200. Tanah di mana lebih dari 35 % butirannya lolos ayakan No. 200 diklasifikasikan ke dalam kelompok A-4, A-5, A-6, dan A-7. Butiran dalam kelompok A-4 sampai A-7 tersebut sebagian besar adalah lanau dan lempung. Sistem klasifikasi ini didasarkan pada kriteria di bawah ini:

1. Ukuran butir
 - Kerikil adalah bagian tanah yang lolos ayakan dengan diameter 75 mm (3in) dan yang tertahan pada ayakan No. 20 (2 mm).

Pasir adalah bagian tanah yang lolos ayakan No. 10 (2mm) dan yang tertahan pada ayakan No.200 (0,075).

Lanau dan lempung adalah bagian tanah yang lolos ayakan No.200.

2. Plastisitas

Nama berlanau dipakai apabila bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastis [*Plasticity index (PI)*] sebesar 10 atau kurang. Nama berlempung dipakai bilamana bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastis sebesar 11 atau lebih.

3. Batuan

Apabila batuan (ukuran lebih besar dari 75 mm) ditemukan di dalam contoh tanah yang akan ditentukan klasifikasi tanahnya, maka batuan-batuan tersebut harus di keluarkan terlebih dahulu. Tetapi, persentase dari batuan yang di keluarkan tersebut harus dicatat.

Sistem klasifikasi tanah berdasarkan lolos ayakan dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut ini:

Tabel 2. 1 Klasifikasi Tanah Berdasarkan AASHTO

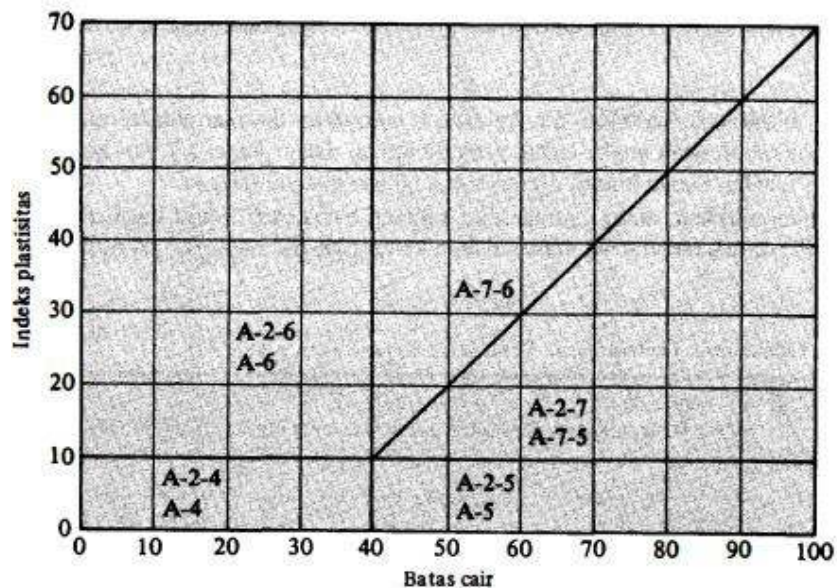
Klasifikasi umum	Tanah berbutir (35% atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No.200)						
	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Analisis ayakan (% lolos) No.10 No. 40 No. 200	Maks 50 Maks 30 Maks 15	Maks 50 Maks 25	Min 51 Min 10	Maks 35	Maks 35	Maks 35	Maks 35
Sifat fraksi yang lolos ayakan No.40 Batas cair (LL) Indeks Plastis (PI)	Maks 6		NP	Maks 40 Maks 10	Maks 41 Maks 10	Maks 40 Maks 11	Maks 41 Maks 11
Tipe material yang paling dominan	Batu pecah, kerikil, dan pasir		Pasir halus	Kerikil dan pasir yang berlanau atau berlempung			
Penilaian sebagai bahan tanah dasar	Baik sekali sampai baik						

Klasifikasi umum	Tanah lanau-lempung (Lebih dari 35% dari seluruh contoh lolos ayakan No.200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6*
Klasifikasi kelompok				
Analisis ayakan (% lolos) No. 10 No. 40 No. 200	Min 36	Min 36	Min 36	Min 36
Sifat fraksi lolos ayakan No. 40 Batas cair (LL) Indeks plastis (PI)	Maks 40 Maks 10	Maks 41 Maks 10	Maks 40 Maks 11	Maks 41 Maks 11
Tipe material yang paling domina	Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian sebagai bahan tanah dasar	Biasa sampai jelek			

A-3, A-4, A-5, A-6, dan A-7. + untuk Grafik Indeks Plastisitas (PI) untuk tanah dalam kelompok A-2, A-7-6, $PI > LL-30^*$ untuk A-7-5, $PI \leq LL-30$

(Sumber: Das, 1995)

Nilai-nilai Batas Atterberg untuk sub kelompok tanah dapat dilihat pada Gambar 2.1 sebagai berikut:



Gambar 2. 1 Nilai-nilai Batas Atterberg untuk sub kelompok tanah.

(Sumber: Das, 1995)

2.2.2 Sistem Klasifikasi USCS

Sistem klasifikasi tanah *unified* atau *unified soil classification system* (USCS) diajukan pertama kali oleh Casagrande. Sistem klasifikasi USCS mengklasifikasikan tanah kedalam dua (2) kategori utama:

1. Tanah berbutir-kasar (*coarse-grained-soil*), yaitu: tanah kerikil dan pasir dimana kurang dari 50% berat total contoh tanah ayakan No.200. Simbol dari

kelompok ini mulai dari huruf awal G atau S. G adalah symbol untuk kerikil (*gravel*) atau tanah berkerikil, dan S adalah untuk pasir (*sand*) atau tanah berpasir.

2. Tanah berbutir halus (*fine-grained-soil*), yaitu: tanah dimana lebih dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No. 200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal M untuk lanau (*silt*) anorganik, C untuk lempung (*clay*) anorganik, dan O untuk lanau-anorganik dan lempung-organik. Simbol PT digunakan untuk tanah gambut (*peat*), *muck*, dan tanah-tanah lain dengan kadar organik yang tinggi.

Secara detail, Klasifikasi tanah sistem USCS dapat dilihat pada Tabel 2.2 dengan cara membaca tabel berikut ini.

Tabel 2. 2 Sistem klasifikasi Tanah Unified

Divisi Utama	Simbol Kelompok	Nama Jenis	Nama Jenis	
Tanah berbutir kasar 50% butiran tertahan saringan no. 200 (0.075 mm)	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir-kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4 \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \text{ antara } 1 \text{ dan } 3$
		GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir-kerikil atau tidak mengandung butiran halus	
	Kerikil banyak kandungan butiran halus	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil pasir-lempung	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$
		GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil pasir-lempung	Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$ Bila batas Atterberg berada di daerah arsis dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol
	Pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos saringan no. 4 (4.75 mm)	SW	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus.	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6 \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \text{ antara } 1 \text{ dan } 4$
		SP	Pasir gradasi buruk, pasir kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus.	
Kerikil banyak kandungan butiran halus	SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$	
	SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung	Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$ Bila batas Atterberg berada di daerah arsis dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol	
Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0.075 mm)	Lanau dan lempung batas cair 50% atau kurang	ML	Lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau berlempung	
		CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus ('lean clays')	
		OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah	
	Lanau dan lempung batas cair > 50%	MH	Lanau tak organik atau pasir halus diatomae, lanau elastis,	
		CH	Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk ('fat clays')	
		OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi	
Tanah dengan kadar organik tinggi	P _t	Gambut ('peat') dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi.	Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488	

(Sumber: H. C. Hardiyatmo, 2011)

2.3 Sifat-Sifat Fisik Tanah

Untuk mendapatkan sifat-sifat fisik tanah, maka ada beberapa ketentuan yang harus diketahui terlebih dahulu, diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Kadar Air (W)

Kadar air suatu tanah adalah properti tanah yang menggambarkan perbandingan dari berat air yang terdapat pada suatu sampel dengan berat dari partikel tanah kering.

2. Berat volume tanah (γ)

Berat volume tanah (berat satuan = *unit weight*) adalah besarnya suatu berat tanah tiap satuan volume. Berat satuan tanah ditentukan berdasarkan perbandingan antara berat tanah dengan volume yang diisinya.

3. Berat jenis (Gs)

Sifat fisik tanah ini dapat ditentukan dengan mengetahui berat jenis tanahnya dengan cara cotoh tanah yang lolos saringan No.200 menggunakan labu ukur. Berat jenis tanah adalah perbandingan anantara berat volume butiran padat dengan volume air pada temperature 40°C.

4. Batas Atterberg

Batas *Atterberg* adalah batas konsisistensi dimana keadaan tanah melewati keadaan lainnya yang terdiri dari batas cair, batas plastis, dan indeks plastisitas.

5. Batas Cair (*Liquid Limit*, LL)

Batas cair adalah kadar air minimum dimana tanah tidak mendapat gangguan dari luar. Tujuannya adalah untuk menentukan kadar air suatu jenis tanah pada batas anantara keadaan plastis dan keadaan cair.

6. Batas Plastis (*Plastic Limit*, PL)

Batas plastis adalah kadar air minimum dimana tanah dapat dibentuk seara plastis. Tujuan nya adalah untuk menentukan kadar air suatu jenis tanah pada keadaan batas anantara keadaan plastis dan keadaansemi padat.

7. Indeks Plastisitas (*Plasticity Indeks*, PI)

Indeks Plastisitas adalah selisih batas cair dan batas plastis, Indeks Plastisitas merupakan interval kadar air dimana tanah masih bersifat plastis. Karena itu, Indeks Plastisitas menunjukkan sifat keplastisan tanah.

8. Analisis Saringan

Tujuan dari analisis saringan adalah untuk mengetahui persentasi butiran tanah. Dengan menggunakan 1 (satu) set saringan, setelah itu bahan-bahan organik dibersihkan dari sampel tanah dan di gumpalan-gumpalan di pecah menjadi partikel-partikel yang lebih kecil, kemudian diayak dan dicatat setiap berat sampel tertahan di setiap saringan. Tujuan akhir dari analisa saringan adalah untuk memberikan nama dan mengklasifikasi, sehingga dapat diketahui sifat-sifat fisik tanah.

2.4 Pondasi Dalam (*Deep Foundation*)

Pondasi dalam pada umumnya digunakan untuk bangunan dengan beban yang besar serta berfungsi untuk meneruskan beban dari struktur atas ke tanah keras.

2.4.1 Tipe dan Jenis Pondasi Dalam

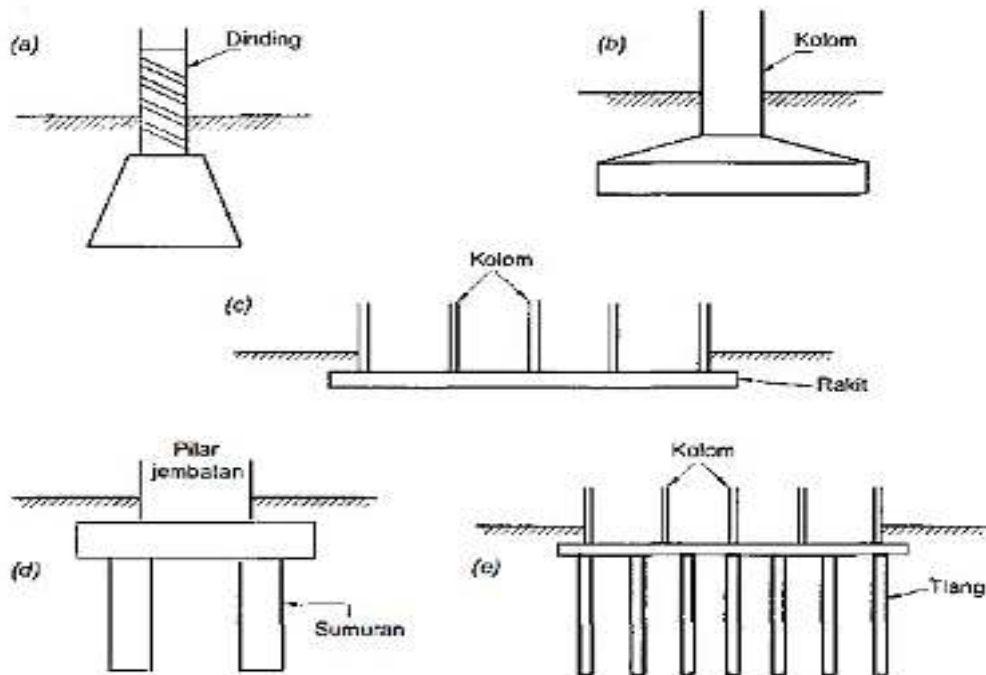
Pondasi dalam didefinisikan sebagai fondasi yang meneruskan beban bangunan ke tanah keras atau batu yang terletak lebih jauh dari permukaan. Pondasi dalam dapat dibedakan kedalam 2 (dua) jenis pondasi dalam yaitu:

1. Pondasi sumuran (*Pier foundation*) yaitu merupakan bentuk peralihan antara pondasi dangkal dan pondasi tiang, digunakan apabila tanah dasar lebih kuat terletak pada kedalaman yang relatif dalam (Peck. Dkk, 1953). Dimana pondasi sumuran memiliki kedalaman (D) dibagi dengan lebar (B) lebih besar dari 4 (empat) atau $D/B > 4$ sedangkan pondasi dangkal $D/B \leq 1$.
2. Pondasi tiang (*pile foundation*) yaitu pondasi ini digunakan jika kedalaman normal tidak dapat memikul bebannya, dan tanah keras terdapat sangat dalam jauh dari permukaan. Demikian jika bangunan terletak pada timbunan yang cukup tinggi, sehingga jika bangunan di letakkan pada tanah timbunan yang cukup tinggi akan di pengaruhi oleh penurunan yang cukup besar. Perbedaannya dengan pondasi sumuran adalah diameter pondasi tiang relatif kecil dan lebih panjang pada umumnya (Hardiyatmo, 2011).

Menurut (Hardiyatmo, 2011), pondasi *pile* dapat dibagi 2 (dua) berdasarkan pelaksanaannya:

1. Pondasi tiang pancang beton bertulang pracetak (*precast reinforced concert pile*)
2. Pondasi tiang cor di tempat (*cast in place*), sering di sebut dengan tiang *bored pile*.

Pada umumnya pondasi dapat dibagi beberapa tipe berdasarkan bentuk dan fungsinya. Jenis pondasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut ini:



Gambar 2. 2 Macam – macam tipe pondasi: (a) pondasi memanjang, (b) pondasi telapak, (c) pondasi rakit, (d) pondasi sumuran, (e) pondasi tiang
(Sumber: H. C. Hardiyatmo, 2011)

Menurut (Hardiyatmo, 2008) Pondasi tiang dapat di bagi menjadi 3 (tiga) kategori berdasarkan besar perpindahannya adalah sebagai berikut:

1. Tiang perpindahan besar (*Large displacement*),
Tiang perpindahan besar yaitu tiang pejal atau belubang dengan ujung tertutup yang dipancang kedalam tanah yang mengakibatkan perpindahan tanah yang relatif besar.
2. Tiang perpindahan kecil (*small displacement pile*)
Tiang perpindahan kecil yaitu sama seperti tiang kategori tiang pertama hanya volume tanah yang dipindahkan saat pemanjangan relatif kecil.

3. Tiang Tanpa Perpindahan (*non- displacement pile*)

Tiang tanpa perpindahan yaitu tiang yang terdiri dari tiang yang di pasang di dalam tanah dengan cara menggali atau mengebor tanah. Kategori tiang tanpa perpindahan yakni pondasi tiang bor/bore pile.

2.4.2 Penggunaan Pondasi Tiang Bor (*Bored Pile*)

Menurut (Hardiyatmo, 2011), penggunaan pondasi *bored pile* memiliki beberapa keunggulan antara lain yaitu:

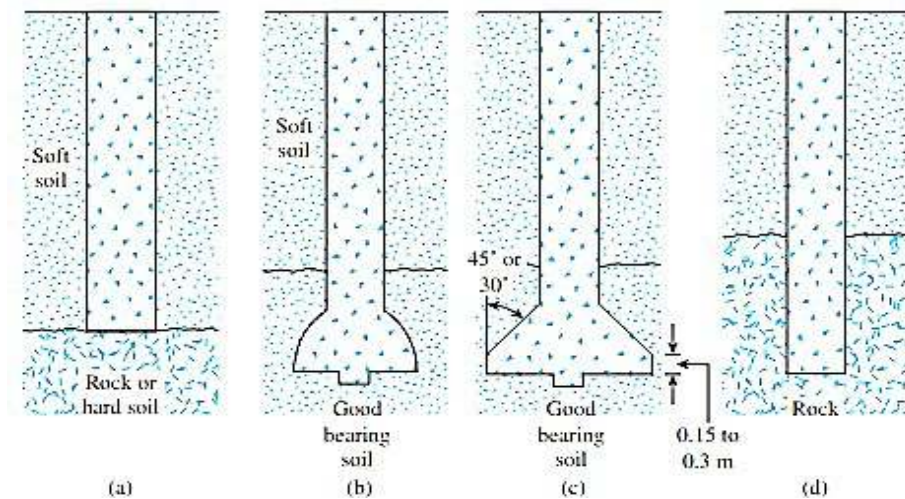
1. Pemasangan tidak menimbulkan kebisingan dan geteran yang dapat merusak bangunan sekitar.
2. Mengurangi kebutuhan beton dan tulangan dowel pada plat penutup (*pile cap*) kolom dapat diletakkan di puncak tiang.
3. Kedalaman tiang dapat bervariasi.
4. Tanah dapat diperiksa dan di cocokkan dengan data laboratorium.
5. Dapat dipasang menembus lapisan batuan
6. Diameter tiang dapat di perbesar dan bila perlu diameter ujung tiang dapat diperbesar.
7. Tidak ada resiko kenaikan muka tanah.
8. Penulangan tidak dipengaruhi oleh tegangan pada waktu pengangkutan dan pemancanagan.

Hal ini merupakan salah satu pertimbangan penggunaan pondasi tiang bor pada proyek jalan layang Kereta Api yang dibangun di dekat rel kereta api dan di sekitar konstruksi terdapat bangunan rel Kereta Api yang masih aktif beroperasi.

2.4.3 Jenis Pondasi Tiang Bor (*Bored Pile*)

Pondasi *bored pile* diklasifikasikan sesuai dengan rancangan untuk meneruskan beban struktur kelapisan tanah keras. Jenis-jenis dari pondasi *bored pile* dapat dilihat pada Gambar 2.3 yaitu:

- a. *Bored pile* lurus ke tanah keras.
- b. *Bored pile* yang di perbesar berbentuk bel.
- c. *Bored pile* yang di perbesar berbentuk trapezium.
- d. *Bored pile* lurus untuk tanah batuan.



Gambar 2. 3 Jenis-jenis pondasi *bored pile*
(Sumber: Das, 2011)

2.5 Penyelidikan Tanah (*Soil Investigation*)

Penyelidikan kondisi tanah merupakan prasyarat dalam perencanaan pondasi tiang. Dalam perencanaan pondasi *bored pile* penyelidikan ini sangat penting dimana penggunaan data-data tersebut sangat berfungsi untuk memahami kondisi geologi, sifat tanah, dan kekuatan tanah setempat. Jenis penyelidikan ini disesuaikan dengan pada jenis proyek, kepentingan proyek, kondisi tanah, dan uji lapangan (Bowles, 1997).

Menurut (Hardiyatmo, 2011) jenis penyelidikan yang ada pada umumnya dilakukan dalam merencanakan pondasi adalah:

1. Penyelidikan dilapangan (*in site test*), Jenis penyelidikan dilapangan seperti pengeboran (*hand boring ataupun machine boring*), *Cone Penetrometer Test* (sondir), *Standart Penetretion Test* (SPT), uji beban plat (*plate load test*), uji kipas dilapangan (*Vane shear test*), dan *Dynamic Cone Penetrometer*.
2. Penyelidikan di laboratorium (*laboratory test*), Jenis penyelidikan di laboratorium terdiri dari uji Index Properties test (*Atterbarg Limit, Water Content, Spesific Gravity, Shieve Analysis*), dan Engineering Properties tanah (*Direct Shear Test, Triaxial Test, Consilidation Test, Permeability Test, Compaction test*, dan CBR).

Dari hasil penyelidikan tanah di lapangan diperoleh contoh tanah (*soil sampling*) yang dapat di bedakan menjadi 2 (dua) yaitu:

1. Contoh tanah tidak terganggu (*undisturbed soil*)

Contoh tanah yang dikatakan tidak terganggu apabila contoh tanah itu dianggap masih menunjukkan sifat asli dari contoh tanah tersebut. Sifat asli yang dimaksud adalah contoh tanah tersebut tidak mengalami perubahan pada struktur asli, kadar air, atau susunan kimianya. Contoh tanah tidak terganggu digunakan untuk percobaan *Engineering Properties*.

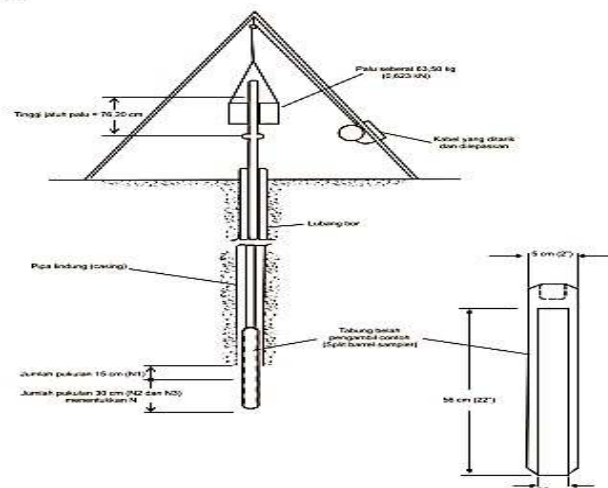
2. Contoh tanah terganggu (*disturbed soil*)

Contoh tanah terganggu adalah contoh tanah yang diambil tanpa adanya usaha-usaha yang dilakukan untuk menjaga contoh tanah dari struktur asli tanah tersebut. Contoh tanah terganggu digunakan untuk percobaan uji *Index Properties* tanah.

Selain itu, faktor lokasi dan tipe bangunan yang di bangun juga dapat menentukan jenis pondasi yang digunakan. Untuk bangunan yang akan dibangun dekat dengan pemukiman masyarakat dan rel Kereta Api seperti halnya jembatan layang Kereta Api memiliki beban atas yang sangat besar sehingga pemilihan jenis pondasi adalah pondasi *bored pile*.

2.5.1 Standart Penetration Test (SPT)

SPT (*standart penetration Test*) adalah suatu metode pengujian dengan pengeboran untuk mengetahui perlawanan dinamik tanah. Pelaksanaan uji SPT dilakukan bersamaan dengan pengambilan contoh tanah dengan menggunakan alat split spoon sampler dengan diameter 50 mm dan panjang 500 mm. Uji *Standart Penetration Test* (SPT) dilakukan pada setiap lobang bor teknik dengan interval pengujian 1,5-2,0 m. Pada uji SPT, indikasi tanah keras diartikan sebagai lapisan dengan nilai SPT diatas 50 pukulan / 30.0 cm sebanyak 3 (tiga) kali pada 3 (tiga) kedalaman berturut-turut yaitu 15 cm. Prinsip pelaksanaan Uji *Standart Penetration Test* yaitu dengan memukul tabung standart kedalam lubang bor sedalam 450 mm dengan menggunakan palu seberat 63,5 kg yang jatuh bebas pada ketinggian 760 mm. Dihitung jumlah pukulan untuk melakukan penetrasi sedalam 150 mm. jumlah yang digunakan adalah pada penetrasi sedalam 300 mm terakhir. (SNI-4153 "Cara Uji Penetrasi Lapangan dengan SPT", 2008) dan ASTM D-1586-67)



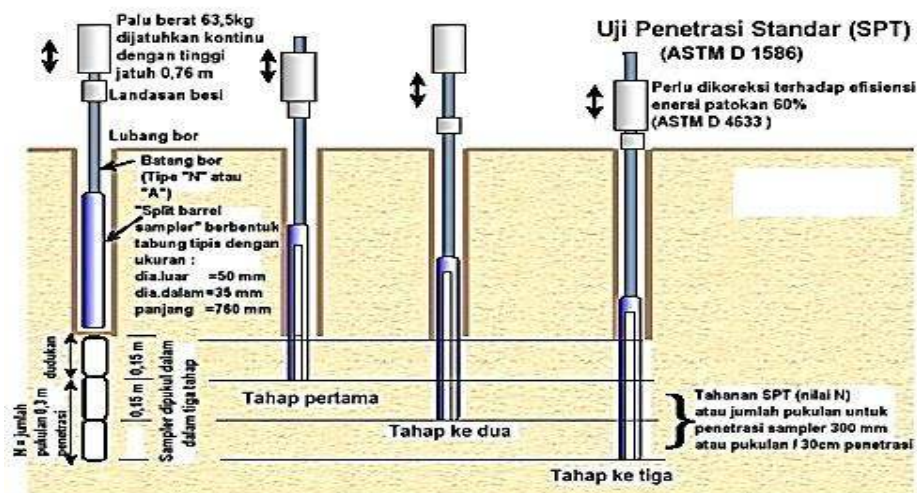
Gambar 2. 4 Penetrasi dengan alat *Standart Penetration Test (SPT)*
(Sumber: SNI 4153 – 2008)

Menurut SNI 4153-2008, prosedur pengujian SPT terdiri dari beberapa bagaian utama, yaitu:

1. Ketika lubang bor mencapai kedalaman yang diinginkan, alat bor diangkat ke atas. Sampler kembali di pasang di ujung batang bor dan kembali di turunkan ke dasar lubang bor.
2. Alat pengambil sampel standard (*Standard split-barrel sampler/split-spoon SPT*) dengan panjang 500 mm yang dimasukkan kedalam lobang bor, lalu di tumbuk hingga masuk kedalam tanah. Jumlah tumbukan inilah yang selanjutnya di catat sebagai nilai tumbukan dari SPT dalam satuan *blows/pukulan*.
3. Hummer pemukul dengan berat 140 lb (63,5 kg) yang dijatuhkan secara bebas untuk menumbuk sampler diatas hingga masuk ke dalam tanah. Tinggi jatuh dari hummer adalah 30 inchi (76 cm)
4. Jumlah pukulan yang di perlukan untuk menancap sampler di setiap interval jarak 15 cm (6 in) dan dicatat. Sehingga terdapat 3 buah nilai tumbukan yang di perlukan untuk memasukan seluruh panjang sampler ke dalam tanah yang dicatat sebagai N_1 , N_2 , dan N_3 .
5. Pencatatan dilakukan tiga kali untuk tiga kali interval 15 cm. Harga- harga yang di dapat pada dua interval 15 cm terakhir kemudian di jumlahkan, dan angka ini merupakan angka N-SPT.

$$N_{0,30} = N_2 + N_3 \quad 2.1$$

Uji SPT dapat di hentikan jika jumlah pukulan sudah lebih dari 50 kali sebelum penetrasi 30 cm tercapai. Berikut adalah skema urutan Standart Penetrasi Test dapat dilihat pada gambar berikut. Kemudian hasil dari pekerjaan bor dan SPT di tuangkan dalam lembaran Driling log. Skema Proses uji penetrasi standart dapat dilihat pada Gambar 2.5 sebagai berikut:



Gambar 2. 5 Skema urutan *Standart Penetration Test*
(Sumber: SNI-4153-2008)

2.5.2 Tujuan Pengujian dengan Alat *Standart Penetration Test*

Adapun tujuan dari penyelidikan tanah menggunakan alat SPT yaitu:

1. Menentukan nilai kepadatan efektif dan sudut geser dalam (σ') tanah tersebut dari pengambilan contoh tanah dengan menggunakan tabung split spoon standart.
2. Dapat diketahui jenis tanah dan ketebalan dari lapisan tanah tersebut.
3. Untuk mendapat perlawanan kumulatif pada perlawanan penetrasi tanah dan menetapkan kepadatan dari tanah yang tidak berkohesi yang biasanya sulit diambil sampelnya.

2.5.3 Koreksi Hasil Uji SPT

Skepton (1983) meneliti bahwa pengaruh prosedur pengujian SPT terhadap nilai N_{60} yang di peroleh. N_{60} dikoreksi terhadap cara jatuh pemukul, tipe landasan (*anvil*) dan panjang total batang pipa bor. Efisiensi tenaga sistem balok derek dengan palu donat (*donut hammer*) dan palu pengaman (*safety hammer*) berkisar antara 35% sampai 85%, sementara efisiensi tenaga palu otomatis

(*automatic hammer*) berkisar antara 80% sampai 100%. Jika efisiensi yang diukur (E_f) diperoleh dari kalibrasi alat, nilai N terukur harus dikoreksi terhadap efisiensi sebesar 60%. (Hardiyatmo, 2011)

Skempton (1986) menyarankan persamaan untuk mengoreksi N dari lapangan dengan memperhatikan pengaruh prosedur pengujian diameter lubang bore dan panjang batang bor:

$$N_{60} = \frac{1}{0,6} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{gh} \right) \cdot C_d \cdot C_s \cdot C_l \cdot N \tag{2.2}$$

Dimana,

N_{60} = efisiensi 60%

$\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{gh} \right)$ = efisiensi yang terukur

N = nilai N yang harus dikoreksi

C_d = Koreksi diameter lubang bor

C_s = Koreksi oleh tipe tabung sampler SPT

C_l = Koreksi untuk panjang tabung bor

Tabel 2. 3 Efisiensi pemukul (E_{60}) (Clayton, 1990)

Negara	Tipe pemukul	Mekanisme pelepasan pemukul	Efisiensi Pemukul, E_{60}
Argentina	Donat	Cathead	0,45
Brasilia	Pin weight	Dilepas tangan	0,72
China	Otomatis	Trip	0,60
	Donat	Dilepas	0,55
	Donat	Cathhead	0,50
Columbia	Donat	Cathead	0,50
jepang	Donat	Tombi trigger	0,78 - 0,85
	Donat	Cathead 2 turn + pelepas special	0,65 - 0,67
Inggris	Otomatis	Trip	0,73
Amerika	Aman	2 turn on cathead	0,55 - 0,60
	Donat	2 turn on cathead	0,45
Venezuela	Donat	Cathead	0,43

(Sumber: Hardiyatmo, 2011)

Dalam beberapa hubungan korelatif, nilai tenaga terkoreksi N_{60} yang dinormalisasi terhadap pengaruh tekanan vertikal efektif (*overburden*), dinyatakan dengan N_{60} seperti dijelaskan dalam persamaan 2.3 berikut dan Tabel 2.3. Nilai N_{60} menggambarkan evaluasi pasir murni untuk interpretasi kepadatan relatif, sudut geser, dan potensi likuifaksi.

$$(N_1)_{60} = N \times E_{60} \tag{2.3}$$

Dengan,

Faktor koreksi tekanan *vertical overburded* dapat ditentukan dengan persamaan Skempton (1986) sebagai berikut:

$$C_{N1} = \frac{1}{(1.2 + C_{\sigma'v})} \quad 2.4$$

Dimana, $C_{\sigma'v}$

$C_{\sigma'v}$ = untuk pasir lepas diambil nilai $C_{\sigma'v} = 2.2$ dan untuk pasir padat nilai $C_{\sigma'v} = 3.2$

$(N_1)_{60}$ = Nilai SPT yang dikoreksi terhadap pengaruh efisiensi tenaga 60%

C_{N1} = Faktor koreksi terhadap tegangan vertical efektif (nilainya ≤ 1.70)

$\sigma'v$ \equiv Tekanan atmosfer $100 \text{ (kN/m}^2\text{)}$

Tabel 2. 4 Koreksi-koreksi yang digunakan dalam uji SPT (SNI 4153:2008)

Faktor	Jenis alat	parameter	koreksi
Tegangan vertical efektif		C_{N1}	$2.2 / (1.2 + C_{\sigma'v})$
Tegangan vertical efektif		C_{N1}	$C_{N1} \leq 1.7$
Rasio tenaga	Palu donat (donut hammer)	$C_{\sigma'v}$	0.5 s.d 1.0
Rasio tenaga	Palu pengaman (safety hammer)	$C_{\sigma'v}$	0.7 s.d 1.2
Rasio tenaga	Palu otomatis (otomatic-trip)	$C_{\sigma'v}$	0.8 s.d 1.3
Diameter bor	65 s.d 115 mm	$C_{\sigma'v}$	1.0
Diameter bor	150 mm	$C_{\sigma'v}$	1.05
Diameter bor	200 mm	$C_{\sigma'v}$	1.15
Panjang batang	<3 m	$C_{\sigma'v}$	0.75
Panjang batang	3 s.d 4 m	$C_{\sigma'v}$	0.80
Panjang batang	4 s.d 6 m	$C_{\sigma'v}$	0.85
Panjang batang	6 s.d 10 m	$C_{\sigma'v}$	0.95
Panjang batang	10 s.d 30 m	$C_{\sigma'v}$	1
Pengambilan contoh	Tabung standar	$C_{\sigma'v}$	1.0
Pengambilan contoh	Tabung dengan pelapis(linear)	$C_{\sigma'v}$	1.1 s.d 1.3

(Sumber: Reza, S.W, 2019)

2.6 Menentukan Parameter Tanah Berdasarkan Korelasi Nilai N-SPT

Menentukan parameter tanah merupakan tahapan paling penting dalam perencanaan pondasi. Kesalahan pada penentuan parameter tanah pada perencanaan pondasi sangat berakibat buruk pada kesetabilan bangunan. Untuk menentukan besar parameter data tanah yang digunakan untuk menentukan desain pondasi tiang bor seperti: Kohesi (c), *undrained shear strength* ($\sigma'v$), berat volume (γ_{sat}), ataupun (ϕ), dan besar sudut geser dalam (ϕ).

Menentukan parameter tanah dilakukan dengan mencari korelasi antara hasil uji lapangan dengan parameter-parameter tersebut. Parameter tanah yang digunakan diusahakan memiliki tingkat ketelitian optimum. Maka berikut ini adalah korelasi parameter tanah dari data pengujian data lapangan.

1. Korelasi N-SPT untuk Menentukan Nilai Cu

Untuk nilai *undrained shear strength* (Cu) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan korelasi Stroud (1975).

$$\frac{q_u}{q_p} = 0,16 N_{60} \tag{2.5}$$

Dimana, q_p = Tekanan atmosfer $\approx 100 \text{ kN/m}^2$

Tabel 2. 5 Variasi nilai q' dengan indeks plastis (PI) (Stroud, 1975 & salgado)

PI	q'
15	0,068
20	0,055
25	0,048
30	0,045
40	0,044
60	0,043

(Sumber: Warman, 2019)

2. Korelasi N-SPT untuk Menentukan Nilai Sudut Geser (ϕ)

Nilai sudut geser (ϕ) diperoleh dari grafik hubungan antara $q_{u, \text{avg}}$ dengan sudut geser (ϕ) dimana besar sudut geser (ϕ) dapat di hitung dengan persamaan Hanson dan Thornburn (1989) sebagai berikut:

$$\phi(\text{deg}) = 27,1 + 0,3 q_{u, \text{avg}} - 0,00054 q_{u, \text{avg}}^2 \tag{2.6}$$

Dimana,

$$q_{u, \text{avg}} = q_p \cdot N_{60} \tag{2.7}$$

$$q_p = 0,77 \log \frac{20}{0,01056 \cdot \sigma} \tag{2.8}$$

(Untuk $\sigma \geq 20 \text{ kN/m}^2$)

Untuk $q' \geq 23,9 \text{ kN/m}^2$

Menurut (Hardiyatmo, 2008), tekanan overbunden (σ'_{ov}) konstan pada kedalaman kritis (z_c) kira-kira 10 sampai 20D dan beberapa peneliti menganggap nilai $z_c \geq 20D$.

3. Korelasi N-SPT untuk Menentukan Nilai Modulus Elastisitas Tanah

Schertman (1970) mengatakan bahwa modulus elastisitas tanah dapat di peroleh dengan menggunakan korelasi dari data N-SPT. Korelasi tersebut dapat dilihat dari beberapa jenis tanah sebagai berikut:

- Tanah pasir

$$E_p \left(\frac{\text{kg/cm}^2}{\text{cm}^2} \right) = 766 N$$

$$N = N_{p,p}$$

$$E_p = 2E_p \tag{2.9}$$

- Tanah lempung

Nilai modulus young pada tanah lempung sangat tergantung pada riwayat pembebasannya.

Tanah lempung *Normally Consolidated*

$$E_p = 250 C_u - 500 C_u \tag{2.10}$$

Tanah lempung *over Consolidated*

$$E_p = 750 C_u - 1000 C_u \tag{2.11}$$

$C_u = \text{undrained cohesion}$

Tabel 2. 6 Korelasi N-SPT dengan *relative density* (Mayerhoff, 1956).

<i>State of packing</i>	<i>Relative density</i>	<i>Standart penetration resistance, N blows/ft</i>
<i>Very loose</i>	> 0.2	> 4
<i>Loose</i>	0.2-0.4	4-10
<i>Medium dense/ compact</i>	0.4-0.6	10-30
<i>Dense</i>	0.6-0.8	30-50
<i>Very dense</i>	> 0.8	> 50

(Sumber: Hardiyatmo, 2011)

Tabel 2. 7 Hubungan nilai N, konsistensi dan kuat tekan-bebas (q_u) untuk tanah lempung jenuh (terzaghi dan peck, 1948).

<i>Consistency</i>	<i>N-SPT (blow per ft)</i>	<i>Uniconfined compression strength, q_u (kN/cm^2)</i>
Sangat lunak	0 - 2	0 - 25
lunak	2 - 5	25 - 50
sedang	5 -10	50 - 100
kaku	10 - 20	100 - 200
Sangat kaku	20 - 30	200 - 400
Keras	> 30	> 400

(Sumber: Hardiyatmo, 2011)

4. Korelasi N_{60} untuk menentukan berat volume tanah (γ)

- Tanah Pasir (non-kohefif)

Tabel 2. 8 Korelasi N_{60} dengan γ untuk pasir (Peck et. al, 1974; Bowles,1977)

Compacness	Relative density (%)	N-SPT (blows per ft)	Angel of internal friction (deg)	Unit weight	
				Moist (ton/m^3)	Submerged (ton/m^3)
Very loose	0-15	0-4	< 28	<15.7	<9.4
loose	16-35	5-10	28-30	14.9-19.6	8.6-10.2
medium	36-65	11-30	31-36	17.3-20.4	10.5-13.4
dense	66-85	31-50	37-41	17.3-22.0	65-85
Very dense	86-100	>51	>41	>20.4	>11.8

(Sumber: Rahman, 2019)

- Tanah Lempung (Kohesif)

Tabel 2. 9 Korelasi q_u dengan γ untuk lempung (Peck, et. al, 1974; Bowles, 1977)

Consistency	q_u (ton/m^2)	N-SPT (blows per ft)	Saturated unit weight (ton/m^3)
Very soft	0-25	0-2	<15.7
soft	25-50	3-4	15.7-18.8
Medium	50-100	5-8	17.3-19.6
stiff	110-125	9-16	18.1-20.4
Very stiff	115-130	16-32	18.8-22.0
Hard	>130	>32	>20.4

(Sumber: Rahman, 2019)

5. Korelasi Data N_{60} untuk Menentukan Nilai Tahanan Ujung Konus (q_c).

Mayerhof (1976) menyarankan bahwa nilai dari daya dukung ujung tiang q_c untuk tanah pasir homogen, maka dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$q_c = 0.4 N_{60} \leq 4 N_{60} \quad (2.12)$$

Tabel 2. 10 Korelasi N_{60} dengan nilai tahanan ujung konus (q_c)

Jenis tanah	Nilai q_c (ton/cm^2)
Lampung dan lanau	1 - 2 N-SPT
Lanau berpasir	2 -3 N-SPT
Pasir berlanau	3 - 4 N-SPT
pasir	4 - 6 N-SPT

(Sumber: Hamka, 2008)

Berdasarkan korelasi N_{60} dengan nilai tahanan konus (Q_c) dapat juga dilihat pada Tabel 2.10 berdasarkan jenis tanah.

Menurut Briaud et al (1985) menyarankan korelasi dari Q_c pada tanah pasir (non-kohesif) dengan nilai *standard penetration test* (N_{60}), maka dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$Q_c = 19.7 N_{60} (N_{60})^{0.36} \quad 2.13$$

Dengan,

Meyerhof (1956) menyarankan bahwa:

$$Q_c \approx Q_{60} \text{ (Untuk tanah pasir)}$$

Dimana:

N_{60} = rata nilai N_{60} dari ujung tiang (10D sampai 4D)

Q_{60} = tekanan atmosfer (100 kN)

Q_c = tahanan konus (kN/m^2)

2.7 Daya Dukung Aksial Pondasi *Bored Pile* Tunggal

Menurut (Hardiyatmo, 2015), analisis daya dukung mempelajari kemampuan tanah dalam mendukung beban pondasi struktur yang terletak di atasnya. Daya dukung menyatakan tahanan geser tanah untuk melawan penurunan akibat pembebanan, yaitu tahanan yang dapat dikerahkan oleh tanah di sepanjang bidang gesernya.

Menurut (Hardiyatmo, 2008) daya dukung ultimet diperhitungkan pada kondisi keruntuhan jangka pendek atau kondisi tidak terdrainase (*undrained*), maka parameter-parameter tanah yang harus digunakan adalah: ϕ , c , cd , dan γ pada kondisi tak terdrainase (*undrained*). Analisis daya dukung dilakukan dengan cara pendekatan untuk memudahkan perhitungan. Persamaan-persamaan yang dapat dibuat berdasarkan nilai parameter tanah.

2.7.1 Daya Dukung Ujung Tiang Pondasi *Bored Pile* (*End-Bearing*)

Menurut (Das B. M., 2011) daya dukung aksial pondasi *bored pile* pada umumnya terdiri dari 2 (dua) bagian yaitu: daya dukung di ujung tiang dan daya dukung akibat tahanan gesekan di sepanjang tiang, secara umum daya ultimet

pondasi tiang terhadap beban aksial dapat di hitung dengan persamaan sederhana yang merupakan penjumlahan antara tahanan keliling dengan tahanan ujung pondasi, dapat disampaikan dengan persamaan berikut ini:

$$Q_u = Q_t + Q_s \quad 2.14$$

Dan

$$Q_{all} = Q_u / SF \quad 2.15$$

Dengan,

Q_u = Kapasitas ultimet tiang terhadap beban aksial (kN, ton)

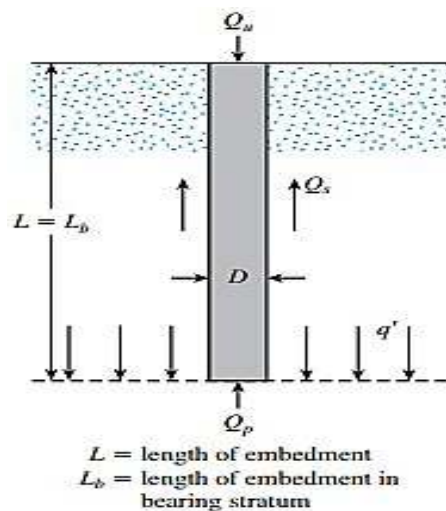
Q_t = Kapasitas ultimet tahanan ujung tiang (*end-bearing*) (kN, ton)

Q_s = Kapasitas ultimet geser selimut tiang (*skin friction*) (kN, ton)

Q_{all} = Daya dukung yang di ijinakan (kN, ton)

SF = Faktor keamanan

Besar daya dukung tiang tunggal dapat di lihat pada Gambar 2.6 dibawah ini.



Gambar 2. 6 Daya Dukung Aksial Tiang Tunggal

(Sumber: Das, 2011)

Menurut (Das, 2011) untuk menentukan daya dukung ujung tiang dengan menggunakan persamaan Terzaghi untuk daya dukung *ultimate* dari pondasi dangkal sebagai berikut:

$$Q_u = (1,3 \cdot \sigma_{1,0}^*) + (2 \cdot \sigma_{1,0}^*) + (0,4 \cdot \sigma_{1,0} \cdot \sigma_{1,0}) \quad 2.16$$

(Untuk pondasi dangkal persegi)

$$Q_u = (1,3 \cdot \sigma_{1,0}^*) + (2 \cdot \sigma_{1,0}^*) + (0,3 \cdot \sigma_{1,0} \cdot \sigma_{1,0}) \quad 2.17$$

(Untuk pondasi dangkal melingkar)

Oleh karena itu, secara umum daya dukung ultimet dapat dinyatakan pada persamaan berikut:

$$Q_u = (Q_{u1}^*) + (Q_{u2}^*) + (Q_{u3}^*) \quad 2.18$$

Karena lebar L tiang relatif kecil, istilah dapat dihilangkan dari sisi kanan persamaan sebelumnya tanpa menimbulkan kesalahan serius. Dengan demikian, persamaan daya dukung ultimet adalah sebagai berikut:

$$Q_u = (Q_{u1}^*) + (Q_{u2}^*) \quad 2.19$$

Secara umum daya dukung ujung *bored pile* pada lapisan tanah ber-kohesif dapat dinyatakan pada persamaan berikut ini:

$$Q_u = \alpha_q Q_u = \alpha_q (q_{u1}' + q_{u2}') \quad 2.20$$

Dimana,

Q_u = Kapasitas ultimet tahan ujung tiang (*end-bearing*) (kN).

α_q = Luas ujung tiang (m^2).

q_u = Tahanan ujung per satuan luas tiang (kN/m^2).

q = kohesi tanah pada ujung tiang (kN/m^2).

q' = Tekanan vertical efektif tanah ujung tiang (kN/m^2).

γ = Berat volume tanah (kN/m^3).

q = Kedalaman tiang (m).

$\alpha_q q_{u1}' q_{u2}'$ = Faktor daya dukung pondasi.

Adapun beberapa metode yang disajikan untuk mencari nilai faktor-faktor daya dukung ultimate ujung pondasi *bored pile* adalah sebagai berikut:

1. Daya Dukung Ujung Tiang Pondasi *Bored Pile* Berdasarkan Data N_{60}

a. Daya Dukung Ujung Tiang Pondasi *Bored Pile* (Reese & Wright, 1977)

Daya dukung ujung tiang pada pondasi *bored pile* dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

- Untuk tanah non-kohesif:

$$Q_u = \frac{40}{0.3048^2} \cdot A \cdot q \quad \text{Untuk } N_{60} > 60 \quad 2.21$$

$$Q_u = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{0.3048^2} \cdot N_{60} \cdot \alpha_q \quad \text{Untuk } N_{60} \leq 60 \quad 2.22$$

Dimana,

A_p = Luas penampang tiang bor, (m^2).

$N_{p,avg}$ = Nilai N pada elevasi dasar tiang.

q_p = Daya dukung ujung tiang, (ton/kN).

Koefisien perlawanan ujung tiang yang di anjurkan 7.

- Untuk tanah kohesif:

$$q_p = 9 \cdot q_p \cdot A_p \quad 2.23$$

Dengan,

$$q_p = \frac{N_{p,avg}}{3} \times 10 \quad 2.24$$

Dimana,

$N_{p,avg}$ = Nilai N pada elevasi dasar tiang.

q_p = *Undrained shear strength* (ton/m^2).

q_p = Daya dukung ujung tiang (*kN, ton*).

A_p = Luas penampang (m^2).

b. Daya Dukung Ujung Tiang Pondasi *Bored Pile* (Mayerhof, 1956)

Mayerhof (1956) menyarankan untuk menghitung daya dukung ujung tiang tunggal pada tanah non-kohesif berdasarkan nilai $N_{p,avg}$. Daya dukung ujung tiang pada pondasi *bored pile* dapat ditentukan berdasarkan jenis tanah.

- Untuk tanah non-kohesif

Pada tanah kohesif daya dukung ujung tiang dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$q_p = 133 \cdot q_{p,avg} \cdot A_p \quad 2.25$$

- Untuk tanah kohesif

Pada tanah non-kohesif daya dukung ujung tiang dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$q_p = \frac{N_{p,avg}}{3} \times 10 = 9 \cdot q_p \cdot A_p \quad 2.26$$

Dimana,

$N_{p,avg}$ = Nilai $N_{p,avg}$ rata-rata terkoreksi di dasar tiang.

Q_p = Daya dukung ujung tiang (kN)

A_p = Luas penampang tiang (m^2)

2. Daya Dukung Ujung Tiang Pondasi *Bored Pile* Berdasarkan Parameter Tanah

Berdasarkan Nilai Sudut Geser Dalam (ϕ)

a. Daya Dukung Ujung Tiang Pondasi *Bored Pile* (Mayerhof, 1976)

Daya dukung ujung tiang dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

- Untuk tanah non-koheusif

Pada tanah non-koheusif ($c = 0$) dapat ditentukan pada persamaan berikut ini:

$$Q_p = \alpha_p Q_{p0} = \alpha_p q'_{\phi}^* \quad 2.27$$

Variasi nilai maksimum harga dari α_p berdasarkan nilai sudut geser dalam (ϕ) dapat dilihat Tabel 2.11 berikut ini:

- Untuk tanah koheusif

Pada tiang tunggal pada lempung jenuh dalam kondisi tidak terdrainase ($u = 0$), daya dukung *bored pile* dapat ditentukan pada persamaan berikut ini:

$$Q_p = \alpha_p Q_{p0} = 9 \alpha_p c_u \quad 2.28$$

Dimana, c_u = kohesi tak terdrainase dari tanah di bawah ujung tiang

Tabel 2. 11 Nilai-nilai faktor kapasitas daya dukung (Mayerhof, 1976)

ϕ°	N_p	ϕ°	N_p
20	12,4	33	96,0
21	13,8	34	115,0
22	15,5	35	143,0
23	17,9	36	168,0
24	21,4	37	194,0
25	26,0	38	231,0
26	29,5	39	276,0
27	34,0	40	346,0
28	39,7	41	420,0
29	46,5	42	525,0
30	56,7	43	650,0
31	68,2	44	780,0
32	81,0	45	930,0

(Sumber: Braja M Das, 2011)

b. Daya Dukung Ujung Tiang pada Pondasi Bore Pile (Vesic, 1977)

Vesic (1977) mengusulkan suatu metode untuk menghitung besar daya dukung tiang berdasarkan teori “*expansion of cavasities*”. Menurut teori ini menghitung besar daya dukung berdasarkan nilai tegangan efektif, maka daya dukung dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$Q_u = Q_{pu} (Q_{pu} + \sigma'_{pu}) = Q_{pu} \cdot \sigma'_{pu} \tag{2.29}$$

Dimana,

$$\begin{aligned} \sigma'_{pu} &= \text{Tengangan normal efektif tanah pada ujung tiang} \\ &= \left[\frac{1 + 2Q_0}{3} \right] \sigma' \quad (Q_{pu} / \sigma^2) \end{aligned} \tag{2.30}$$

$$\begin{aligned} Q_0 &= \text{Koefisien tekanan tanah lateral} \\ &= 1 - \sin \phi \end{aligned} \tag{2.31}$$

$$\begin{aligned} \sigma' &= \text{tekanan tanah efektif} \\ q' &= \gamma \sigma \quad (Q_{pu} / \sigma^2) \end{aligned} \tag{2.32}$$

Besarnya N^* = koefisien daya dukung tanah dapat di tentukan berdasarkan persamaan sebagai berikut:

Atau dapat dilihat pada Tabel 2.13.

$$N^* = (N^* - 1) \cot \phi \tag{2.33}$$

Menurut Vesic (1977)

$$N^* = \sigma (I_{pu}) \tag{2.34}$$

Dengan,

$$\begin{aligned} I_{pu} &= \frac{I_{pu}}{1 + I_{pu}} \\ I_{pu} &= \text{Indeks pengurang kekakuan tanah} \\ I_{pu} &= \text{Indeks kekakuan} \\ &= \frac{Q_{pu}}{2(1 + \mu_{pu})(\sigma + \sigma' \tan \phi)} = \frac{Q_{pu}}{\sigma + \sigma' \tan \phi} \end{aligned} \tag{2.35}$$

Q_{pu} = Modulus young tanah

μ_{pu} = Poisson's ratio tanah

$$f_{\phi} = 0.1 + 0.3 \left(\frac{\phi - 25}{20} \right) \quad (\text{Untuk } 25^{\circ} \leq \phi \leq 45^{\circ}) \quad 2.36$$

τ_{ϕ} = modulus geser tanah

Δ = Volumetric strain rata-rata zona plastis dibawah ujung tiang

$$\Delta = 0.005 \left(1 - \frac{\phi - 25}{20} \right) \frac{\sigma'_v}{\sigma'_v} \quad 2.37$$

Untuk kondisi dimana tidak terjadi perubahan volume (misalnya pada pasir padat atau lempung jenuh), maka $\Delta = 0$, sehingga:

$$f_{\phi} = f_{\phi} \quad 2.38$$

Untuk $\phi = 0$ (kondisi *undrained*)

$$f_{\phi} = \frac{4}{3} f_{\phi} (1 - \Delta) + \frac{f}{2} \quad 2.39$$

Atau, untuk menentukan nilai faktor daya dukung pada tanah kohesif dapat di lihat pada tabel 2.13 berikut:

Nilai f_{ϕ} dapat dihitung berdasarkan pengujian konsolidasi dan triaksial dilaboratorium. Sedangkan untuk penentuan awal dari nilai f_{ϕ} dapat direkomendasikan penggunaan nilai pada Tabel 2.12 berikut ini:

Tabel 2. 12 Rekomendasi dari nilai f_{ϕ} (Vesic, 1977)

Soil type	f_{ϕ}
Sand	70 - 150
Silt and clays (drained condition)	50 - 100
Clays (undrained condition)	100 - 200

(Sumber: Bowles, 1986)

Untuk tanah kohesif ($\phi = 0$) nilai f_{ϕ} dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$f_{\phi} = 347 \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma'_v} \right) - 33 \leq 300 \quad 2.40$$

Tabel 2. 13 Variasi nilai N_c^* dengan l_{pda} untuk nilai $\phi = 0$

l_{pda}	N_c^*
10	6,97
20	7,90
30	8,82
40	9,36
60	9,75
80	10,04
100	10,97
200	11,51
300	11,89
400	12,19

(Sumber: (Das, 2011))

Berdasarkan Nilai Undrained Shear Strength (c_u)

Tahanan ujung tiang dihitung berdasarkan nilai *undrained shear strength* (c_u). Harga c_u dapat diperoleh dari uji laboratorium triaxial dan korelasi dari uji lapangan seperti N_{60} , dan q_{tip} pada uji sondir (CPT). Perhitungan tahanan ujung pondasi tiang bor pada berbagai kondisi tanah dapat dilihat sebagai berikut:

a. Daya Dukung Ujung Tiang pada Pondasi *Bored Pile* (Mayerhof, 1976)

- Untuk Tanah kohesif

Daya dukung ujung tiang dapat dihitung dengan mengasumsikan $\phi = 0$. Daya dukung ujung tiang *bored pile* pada tanah kohesif dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$Q_{tip} = c_u \cdot \pi \cdot l_{pda} \cdot \alpha \cong 9 \cdot c_u \cdot l_{pda} \quad 2.41$$

- Untuk tanah non-kohesif

Daya dukung ujung tiang dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$Q_{tip} = \pi \cdot l_{pda} \cdot c_u = \pi \cdot l_{pda} \cdot (c_u \cdot \alpha + c_u \cdot \alpha') \quad 2.42$$

Oleh karena $c = 0$, Sehingga

$$Q_{tip} = \pi \cdot l_{pda} \cdot c_u = \pi \cdot l_{pda} \cdot c_u' \leq \pi \cdot l_{pda} \cdot c_u \quad 2.43$$

Dimana,

$$c_u' = 0.5 \cdot c_u \cdot \alpha \tan \phi \quad 2.44$$

$$Q_{tip} = \pi \cdot l_{pda} \cdot c_u = \pi \cdot l_{pda} \cdot 0.5 c_u \cdot \alpha \tan \phi \quad 2.45$$

b. Daya Dukung Ujung Tiang pada Pondasi *Bored Pile* (Terzaghi, 1967)

Daya dukung ujung tiang dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

- Untuk tanah kohesif

Pada tanah kohesif, besar daya dukung ujung tiang pada tanah kohesif dapat ditentukan pada persamaan berikut:

$$Q_u = \alpha_c \cdot q_{cu} \quad 2.46$$

Dengan,

$$q_{cu} = 1.3 \cdot c_u + \sigma'_{cu} \quad 2.47$$

- Untuk Tanah non-kohesif

Pada tanah non-kohesif, besar daya dukung ujung tiang dapat ditentukan pada persamaan berikut:

$$Q_u = \alpha_c \cdot q_{cu} \quad 2.48$$

Dimana,

Q_u = Daya dukung ujung tiang ultimate (kN, ton)

α_c = Luas penampang tiang (m^2)

c = Nilai *undrained shear strength* tanah di ujung tiang (kN/ m^2)

σ'_{cu} = Faktor daya dukung (≈ 9)

Nilai α_c dari perlawanan ujung dengan gesekan selimut dapat memberikan indikasi jenis tanah dan dapat dan beberapa parameter tanah seperti konsistensi tanah lempung, kuat geser, kepadatan relatif dan sifat kemampatan tanah meski hanya berdasarkan pada korelasi empiris.

3. Daya Dukung Ujung Tiang Pondasi *Bored Pile* Berdasarkan Tahanan Ujung Konus (q_c)

(Hasil Korelasi Nilai N_{60} Dengan Tahanan Ujung Konus (q_c))

a. Daya Dukung Ujung Tiang Pondasi *Bored Pile* (Mayerhof, 1983)

Cara ini digunakan untuk menghitung kapasitas daya dukung tiang pada tanah pasir, Mayerhof (1983) menyusulkan persamaan untuk menentukan kapasitas daya dukung tiang pada pasir dengan memperhatikan skala dan

penetrasi tiang. Daya dukung pada ujung tiang *bored pile* dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$Q_u = \alpha q_u \times A_u \quad 2.49$$

Dimana,

Q_u = kapasitas daya dukung ujung tiang (kN).

αq_u = Luas ujung selimut bawah tiang (m^2).

q_u = Tahanan ujung satuan (kN/m^2).

Tahanan ujung satuan ditentukan dengan persamaan berikut:

$$q_u = \alpha_1 \alpha_2 q_{un} \quad 2.50$$

Dimana,

q_u = Tahanan ujung satuan, untuk tiang bor diambil 70% atau 50%- nya

$q_{un} = q_u$ rata-rata (kN/m^2) pada zona 1d dibawah ujung tiang dan 4d di atasnya.

$\alpha_1 = \{(d + 0,5)/2\}^n$; koefisien modifikasi pengaruh skala, jika $d > 0,5$ m. Jika $d < 0,5$ m, $\alpha_1 = 1$.

$\alpha_2 = L/10d$ (koefisien modifikasi untuk penetrasi tiang dalam lapisan pasir padat saat $L < 10d$, jika $L > 10d$, $\alpha_2 = 1$)

d = Diameter tiang (m)

L = Kedalaman penetrasi tiang dalam lapisan pasir padat (m)

n = Nilai eksponensial (diambil nilainya sama dengan 2)

b. Daya Dukung Ujung Tiang Pondasi *Bored Pile* (de Ruyter dan Beringen, 1979)

Untuk tiang pada tanah lempung, tahanan ujung satuan ditentukan dari analisis tegangan total seperti halnya pada teori kapasitas daya dukung pondasi dalam pada tanah lempung dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$q_u = 5q_{un} ; \text{Dibatasi } q_u \leq 150 \text{ kg}/m^2 (15000 \text{ kN}/m^2) \quad 2.51$$

Dengan,

$$q_u = \frac{q_u}{\alpha_1} \quad 2.52$$

Dimana,

q_u = Tahanan ujung satuan, maksimum 150 kg/cm² (15000 kN/m²)

c_u = Kohesi tak terdrainase (*undrained*)

α = Koefisien tak berdimensi, nilainya anatar 15 sampai 20, biasanya diamabil 20.

Oleh karena metode konstruksi dari tiang bor melakukan pengawasan mutu yang lebih baik di ujung bawah, maka untuk menghindari besarnya resiko penurunan (*settlement*) akibat pemampatan dan rusaknya lapisan tanah bawah ujung tiang bor, maka tahanan ujung tiang bor dibatasi seperti ditunjukkan pada beberapa formula perhitungan di atas.

2.7.2 Daya Dukung Selimut Tiang Pondasi *Bored Pile (Skin Friction)*

Secara umum, pada tanah homogen, daya dukung selimut pondasi *bored pile* dapat di hitung dengan persamaan berikut:

$$Q_u = \alpha \cdot q_u \cdot P = \alpha \cdot \sum q$$
2.53

Dimana,

α = Luas selimut tiang (m²)

P = Keliling penampang (m)

L = Panjang tiang (m)

f = Tahanan friksi (kg/cm²)

Sedangkan tahanan geser untuk tanah berlapis dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$Q_u = \sum (\Delta q)$$
2.54

Atau,

$$Q_u = \sum (\Delta q)$$
2.55

Adapun beberapa metode yang di sajikan untuk mencari faktor-faktor daya dukung tahanan selimut pondasi *bored pile* adalah sebagai berikut:

1. Daya Dukung Selimut Tiang Pondasi *Bored Pile* Berdasarkan Data N_{pp} .

Tahanan selimut tiang bor dapat ditentukan berdasarkan pengujian lapangan yakni pengujian *Standart Penetration Test*. Besar tahanan selimut tiang pondasi *bored pile* dapat di cari dengan persamaan berikut:

a. Daya Dukung Selimut Tiang Pondasi *Bored Pile* (Reese & Wright, 1977)

Daya dukung selimut tiang dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$Q_p = Q_{fs} \cdot \sum_{i=1}^n L_i \cdot \pi \cdot D \tag{2.56}$$

Dimana,

Q_p = Daya dukug selimut tiang (kN).

Q_{fs} = Tahanan satuan skin friction (kN/m²).

L_i = Panjang lapisan tanah (m).

π = Keliling tiang (m²).

• Untuk tanah kohesif:

Nilai tahanan ujung satuan (Q_{fs}) dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$Q_{fs} = \alpha \cdot c_u \tag{2.57}$$

Dimana,

α = Faktor adhesi (berdasarkan penelitian Reese & Wright, 1977)

α = 0.55

c_u = Kohesi tanah (kN/m²)

• Untuk tanah non-kohesif:

Nilai tahanan selimut satuan (Q_{fs}) dapat di tentukan dengan persamaan berikut:

$$Q_{fs} = 0.32 \cdot N_{\text{pp}} \quad (\text{ton}) \quad \text{Untuk } N_{\text{pp}} \leq 53 \tag{2.58}$$

Jika nilai N_{pp} $53 < N \leq 100$ maka, α : dari koreksi langsung dengan N_{pp} .

Nilai tahanan selimut satuan pada tanah non-kohesif dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$Q_{fs} = \frac{N_{\text{pp}} - 53}{450} \times \frac{1}{0.348^2} \quad (\text{ton}) \quad \text{Untuk } N_{\text{pp}} \geq 53 \tag{2.59}$$

b. Daya Dukung Selimut Tiang Pondasi *Bored Pile* (Mayerhof, 1976)

Daya dukung selimut tiang dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$Q_p = Q_{fs} \cdot \sum_{i=1}^n L_i \cdot \pi \cdot D \tag{2.60}$$

Dimana,

- Q_p = Daya dukung selimut tiang (kN)
- f_b = Tahanan satuan *skin friction* (kN/m²)
- l_i = Panjang lapisan tanah (m)
- P = Keliling tiang (m²)

- Untuk non-koheusif

Nilai tahanan selimut tiang satuan (f_b) pada tanah non-koheusif dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$f_b = 0.01 \cdot P \cdot \bar{N}_{\text{avg}} \quad 2.61$$

- Untuk tanah koheusif

Nilai tahanan selimut tiang satuan (f_b) pada tanah koheusif dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$f_b = 0.36 \cdot q_u \quad 2.62$$

Dimana:

- Q_p = Daya dukung selimut tiang (kN).
- f_b = Tahanan selimut tiang satuan (kN/m²).
- \bar{N}_{avg} = Nilai N_{avg} rata-rata terkoreksi di sepanjang tiang.
- P = Luas permukaan tiang (m²).
- q_u = Tekanan atmosfer (100 kN/m²).
- c_u = *undrained shear strength* (kN/m²).

2. Daya Dukung Selimut Tiang *Bored Pile* Berdasarkan Parameter Tanah.

Tahanan selimut tiang bor dapat ditentukan berdasarkan hasil korelasi data pengujian lapangan yakni pengujian *Standart Penetration Test* dengan parameter tanah. Besar tahanan selimut tiang pondasi *bored pile* dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$Q_p = Q_{\text{tip}} + Q_{\text{shaft}} \quad 2.63$$

Dengan,

- Q_p = Kapasitas daya dukung tiang ultimet (kN)
- Q_{tip} = Kontribusi kohesi tanah (c)

Q_{ϕ} = Kontribusi sudut geser dalam tanah (ϕ)

a. Daya Dukung Selimut Tiang Pondasi *Bored Pile* (Braja M Das, 1990)

Kontribusi nilai tahanan kulit (*skin-friction*) untuk sudut geser dalam tanah pasir dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$Q_{\phi} = \sum_{i=1}^n q_{s,i} \cdot l_i \cdot p \quad 2.64$$

Dimana,

Menurut (Das, 2011) Tahanan gesek satuan dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

- Untuk tanah non-kohesif

$$q_s = q_{s-0} \cdot \tan\left(\frac{2}{2.5} \phi_i\right) \quad 2.65$$

Dengan,

q_{s-0} = Kontribusi sudut geser dalam tanah (ϕ) terhadap kapasitas tahanan selimut tiang (Q_{ϕ}/Q)
 q_{s-0} = Koefisien tekanan lateral tanah ($=1-\sin\phi$).

q'_{s-0} = Tekanan vertical efektif pada tengah-tengah lapisan-i.

ϕ_1 = Sudut geser dalam pada lapisan -i.

l_i = Panjang tiang yang tertanam pada lapisan- i.

P = Keliling tiang (m).

- Untuk tanah kohesif

Pada tanah kohesi besar nilai tahanan geser selimut untuk dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$Q_{c} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot q_{u,i} \cdot l_i \cdot p \quad 2.66$$

Dengan,

Faktor adhesi pada tanah kohesif dapat ditentukan dengan persamaan Sladen (1992) sebagai berikut:

$$\alpha = C \left(\frac{q'_{s-0}}{q_{u,i}} \right)^{0.45} \quad 2.67$$

Dimana,

Q_{c} = Kontribusi kohesi tanah (c).

$q_{u,i}$ = kohesi undrained tanah pada lapisan -i (ton/m²).

α = 0.4 samapai 0.5 untuk *bored pile* dan 0.5 untuk *driven pile*.
 Rata-rata tegangan vertical efektif.

- l_i = panjang tiang yang tertanam pada kedalaman $-i$.
- U = luas keliling tiang.

**2. Daya Dukung Selimut Tiang Pondasi *Bored Pile* Berdasarkan Tahanan Ujung Konus (Q_c)
(Hasil Korelasi Nilai N_{60} Dengan Tahanan Ujung Konus (Q_c))**

Tahanan selimut tiang bor dapat ditentukan berdasarkan hasil korelasi data pengujian lapangan yakni pengujian *Standart Penetration Test* dengan tahanan konus (Q_c). Besar tahanan selimut tiang pondasi *bored pile* dapat di cari dengan persamaan berikut:

a. Daya Dukung Selimut Tiang Pondasi *Bored Pile* (Mayerhof, 1983)

Daya dukung pada selimut tiang pada tanah non-kohefif dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$Q_{ul} = \sum \alpha_i \cdot Q_c \quad 2.68$$

Dengan,

Tahanan selimut tiang satuan dapat ditentukan dari nilai kohesi tak terdrainase dengan persamaan berikut:

$$q_{ul} = \alpha_i \cdot Q_c, \quad \text{dengan, } \alpha_i = 1 \quad 2.69$$

Jika tidak dilakukan pengukuran tahanan gesek sisi konus, maka tahanan selimut satuan dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$q_{ul} = \alpha_i \cdot Q_c, \quad \text{dengan, } \alpha_i = 0.005 \quad 2.70$$

Dimana,

q_{ul} = Tahan selimut satuan (kN)

Q_c = Nilai tahanan konus ($60 \text{ t}/\text{cm}^2$)

α_i = Koefisien modifikasi tahanan konus.

b. Daya Dukung Selimut Tiang Pondasi *Bored Pile* (de Ruiter & Beringen, 1979)

Untuk tiang pada tanah kohesif, tahanan gesek satuan dari nilai kohesi tak terdrainase ($q_{ul} = \frac{Q_c}{20} = 0,05 Q_c$). Daya dukung selimut satuan dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$q_{ul} = \alpha_i (Q_c / 20) = 0,05 \alpha_i Q_c \quad 2.71$$

Dimana:

q_u = tahanan gesek satuan, maksimum $1,2 \cdot c_u / \phi_u^2$ (120 kpa)

c_u = kohesi tak terdrainase (*undrained*)

α = faktor adhesi, diambil 1 untuk lempung terkonsolidasi normal, dan 0.5 untuk lempung terkonsolidasi berlebihan

ϕ_u = koefisien tak berdimensi, nilainya antara 15 samapai 20, biasanya diambil 20

2.8 Daya Dukung Dengan Metode Dinamis

Metode dinamis telah banyak digunakan untuk memperkirakan kapasitas daya dukung pondasi *bored pile*. Diperlukan suatu cara dilapangan untuk menentukan apakah sebuah pondasi tiang bor telah mencapai nilai daya dukung yang cukup. Pengujian dinamik daya dukung pondasi *bored pile* adalah sebagai berikut:

2.8.1 HSPLT (*High Strain Pile Load Test*)

HSPLT (*High Strain Pile Load Test*) atau lebih dikenal dengan pengujian PDA (*Pile Driving Analyzer*) Merupakan uji pembebanan dinamik yang cukup populer di Indonesia. Pengujian PDA awalnya hanya digunakan untuk pondasi tiang pancang, namun dengan cara analog, jenis uji ini juga dapat diterapkan pada pondasi bore pile.

Pengujian HSPLT dilakukan sesuai dengan *America Society of Testing Material*, ASTM/D4945-2012. Metode uji untuk pengujian tiang dinamis regangan tinggi. Pengujian telah di sesuaikan dengan Perencanaan Persyaratan Geoteknik (SNI-8460 , 2017).

Cara pengujian pembebanan dinamik dengan cara memasang gauge dan accelerometer didekat kepala tiang, kemudian instrument tersebut diinterpretasikan terhadap gelombang yang terjadi akibat pukulan hammer dikepala tiang. Metode interpretasi membutuhkan pengetahuan mengenai teori perambatan gelombang. Pada uji PDA, digunakan model analitis yang menggabungkan data lapangan dengan teori perambatan gelombang untuk memprediksi besarnya daya dukung ultimit, distribusi gesekan selimut sepanjang tiang dan simulasi perilaku beban-penurunan (*load settlement*) dari tiang. Pengujian tiang dengan *Hight Strain Pile Loads Test* (HSPLT) adalah untuk mendapatkan data tentang:

- Estimasi Daya dukung aksial tiang
- Keutuhan/integritas tiang
- Efisiensi energi yang ditransfer

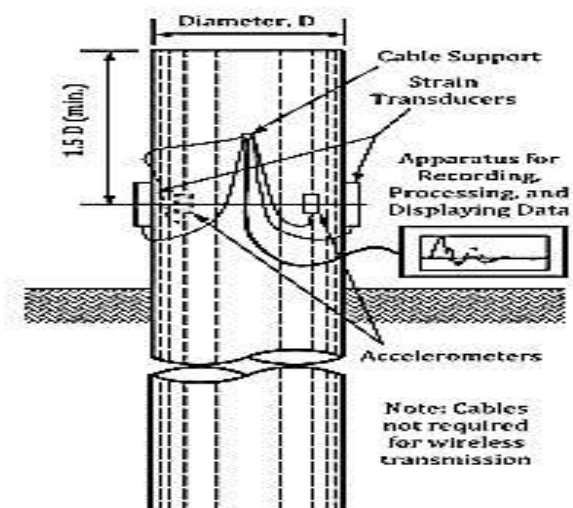
PDA mengukur energi pemancangan actual yang ditransfer selama pengujian. Karena berat palu dan tinggi jatuh palu dapat diketahui, maka efisiensi energy yang di transfer dapat dihitung. Untuk berat *hammer* untuk PDA Test, dapat digunakan berat *hammer* (W) yang tergantung kapasitas ultimet tiang (Q_u) yaitu:

- $W/Q = 1\%$ untuk jenis tanah kohesif kaku atau bebatuan.
- $W/Q = 1,5\%$ untuk jenis tiang friksi pada umumnya.
- $W/Q = 2\%$ untuk pondasi tiang bor dengan jenis tanah daya dukung ujung pondasi tanah berbutir kasar (*grained coarse soils*).

Alat uji HSDP

Berdasarkan Gambar 2.7 Peralatan yang di gunakan pada saat pengujian terdiri dari beberapa alat yaitu:

- Pile Driving Analyzer* (PDA):
- Dua (2) *strain transducer*.
- Dua (2) *accelerometer*.
- Kabel penghubung



Gambar 2. 7 Posisi *Accelerometer* dan *strain transducer* pada elemen *pile* serta perangkat PDA Test.

(Sumber: SNI 8459-2017)

2.8.2 Pelaksanaan Uji HSPLT

Pengujian tiang dinamis dilakukan dengan menempatkan 2 pasang sensor secara berlawanan satu pasang sensor terdiri dari pengukur regangan (*strain transducer*) dan pengukur percepatan (*accelerometer*) yang dipasang dibawah kepala tiang. Prosedur pengujian tiang dinamik secara pekerja persiapan terdiri dari:

- a. Penggalian tanah permukaan sekeliling kepala tiang, apabila kepala tiang sama rata dengan permukaan tanah.
- b. Pengeboran lubang kecil pada tiang untuk pemasangan *strain transducer* dan *accelerometer*.
- c. Pemasangan instrument.

Secara umum, pengujian dilakukan dengan menggunakan PDA-PAX untuk mengumpulkan data dari sensor tersebut. Sensor ditempatkan pada jarak minimum 1,5x diameter tiang dari kepala tiang yang berfungsi untuk menghindari area yang mengalami tegangan akibat pukulan *hammer* pada pengujian. Kepala tiang harus bersih dari material yang mengganggu pengujian seperti bahan kotor, Permukaan tidak rata ataupun sisa tulangan yang belum dibersihkan.

Pada pelaksanaan pengujian dinamik tiang, diperlukan *hammer* yang mampu memobilisasi daya dukung ultimit. Pilihan *hammer* untuk tipe diesel dan hidrolis dapat dilakukan dengan menggunakan analisis persamaan gelombang (*Wave Analysis Program-WAP*) dan drop *hammer* dapat mengambil *hammer* dengan berat yang dapat menghasilkan energy potensial sebesar 1% dari daya dukung ultimit yang diharapkan.

2.9 Evaluasi Perbandingan Daya Dukung Berdasarkan Data N-SPT dengan Case Method.

Evaluasi ini berguna untuk mendapatkan metode yang disarankan dalam mendesain pondasi dengan karakteristik tanah seperti pada proyek jembatan layang kereta api medan – binjai. Evaluasi ini dilakukan dengan cara menghitung selisih persentase daya dukung dengan perhitungan berdasarkan data N-SPT dan berdasarkan data uji PDA-Test.

$$\% \text{ Selisih } = \frac{Q_{\text{N-SPT}} - Q_{\text{PDA-Test}}}{Q_{\text{PDA-Test}}} \cdot 100\% \quad 2.72$$

2.10 Efisiensi Kelompok Tiang

Apabila jarak antara satu kelompok tiang tidak dapat memenuhi jarak minimum antar tiang, maka daya dukung kelompok tiang dalam satu kepala tiang tidak sama dengan daya dukung satu tiang dikali dengan jumlah tiang. Melainkan ada faktor pengali yang besarnya kurang dari satu, yang disebut dengan faktor efisiensi kelompok tiang.

Efisiensi tiang adalah nilai pengali terhadap kapasitas daya dukung tiang tunggal dengan memperhatikan pengaruh kelompok tiang digunakan apabila beban yang harus di tumpu pondasi terlalu besar, dan tidak dapat lagi di topang oleh pondasi tiang tunggal. Susunan dan jarak antar tiang berpengaruh pada hasil daya dukung pondasi kelompok tiang.

Metode Converse-Labarre adalah salah satu metode yang paling populer dan salah satu metoda yang sering dipakai untuk menghitung efisiensi kelompok tiang. Metode ini menggunakan komponen pendekatan berupa nilai jumlah baris tiang, jumlah tiang, diameter tiang, dan spasi konfigurasi kelompok tiang.

Untuk menghitung faktor efisiensi kelompok tiang dapat menggunakan persamaan Converse Labarre, yaitu:

$$\eta_g = 1 - \frac{(m-1)D + (n-1)s}{90mD} \quad 2.73$$

Dimana:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{D}{s}\right)^\circ$$

D = diameter tiang.

s = jarak antar tiang.

m = banyak nya kolom.

n = banyaknya baris.

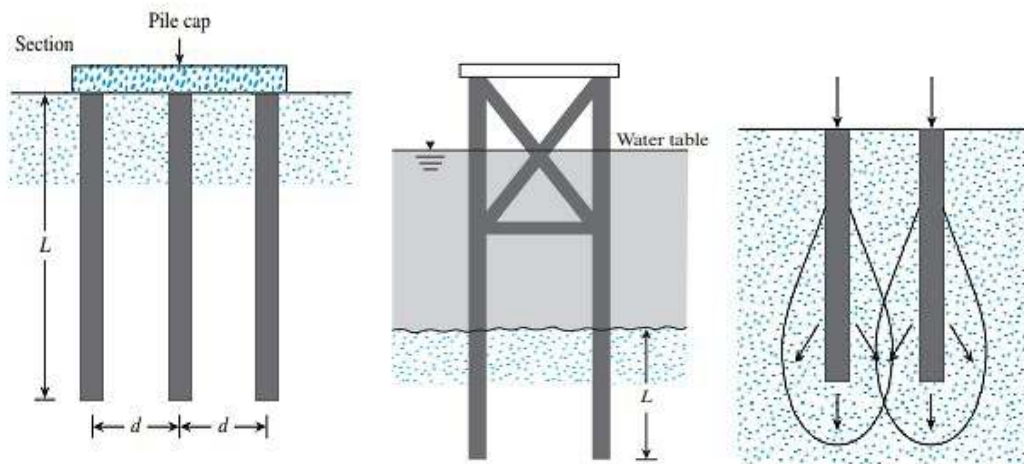
Selain itu menggunakan perhitungan nilai efisiensi diatas, berdasarkan pengalaman beberapa peneliti menyarankan bahwa perilaku kelompok tiang diatas tanah pasir mengikuti beberapa ketentuan berikut:

Untuk tiang pancang dengan jarak antar *pile, center to center*, $s \geq 3D$, maka besar $\eta_{g \max}$ adalah sebesar $\Sigma \eta_{g \max}$.

Sedangkan, untuk tiang bor dengan jarak antar *pile*, $s \approx 3d$ maka besar α_{g} diambil sebesar $\frac{2}{3}$ sampai $\frac{2}{3}$ dari α_{p} .

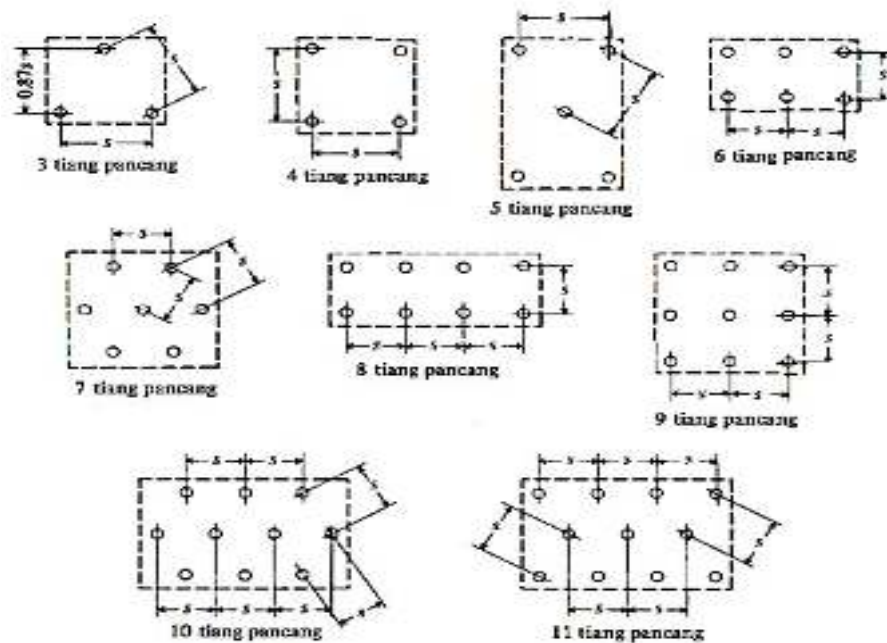
2.11 Daya Dukung Kelompok Tiang

Pada umumnya untuk meneruskan beban dari kolom pada struktur atas ke lapisan tanah bawahnya. Pondasi tiang digunakan dalam kelompok (*group*). Masing-masing tiang disatukan pada bagian atas dengan menggunakan kepala tiang (*pile cap*). Pada umumnya kepala tiang biasanya berada pada permukaan tanah, atau pun berada diatas permukaan tanah. Pada Gambar 2.8 berikut menunjukkan penggunaan kepala tiang pada bentuk pondasi kelompok tiang.



Gambar 2. 8 Penggunaan *pile cap* pada tiang
(Sumber: Das, 1995)

Konfigurasi pengaturan kelompok tiang dalam satu kepala tiang berbeda-beda tergantung pada jumlah tiang yang disatukan. Intensitas tekanan bertumpuk pada (*Superimposed*) bergantung pada beban dan jarak antar tiang *bored pile* yang cukup besar akan mengakibatkan runtuh karena geseran atau terjadi penurunan yang berlebihan. Dari Gambar 2.9 dapat dilihat beberapa jenis konfigurasi kelompok tiang.



Gambar 2. 9 Beberapa contoh konfigurasi kelompok tiang
(Sumber: Bowles, 1986)

Daya dukung kelompok tiang bor dalam satu kelompok tergantung pada jarak antar tiang. Sehingga daya dukung beban kelompok tersebut tidak kurang dari jumlah daya dukung masing-masing tiang. Tetapi jarak minimum antar tiang dari pusat d adalah $2,5D$ dan secara umum jarak antar tiang dibuat 3 sampai 3,5 kali diameter tiang. Daya dukung kelompok tiang didasarkan pada 2 asumsi keruntuhan yang terjadi:

1. Keruntuhan tiang tunggal (*individual pile failure*).
2. Keruntuhan blok (*block failure*).

Daya dukung kelompok tiang di hitung berdasarkan keruntuhan tiang tunggal. Pada tanah lempung dan tanah pasir apabila syarat minimum jarak antar tiang sudah dipenuhi, maka menurut Das (1985) rumus daya dukung yang terdapat dipakai adalah:

$$Q_{gk} = Q_{pk} \times \alpha \times \beta \tag{2.74}$$

Dengan,

Untuk tanah lempung $\alpha = \beta = 0.7$ ($s = 3d$) sampai 1 ($s \geq 8d$)

Untuk tanah pasir $\alpha = \beta = 1$

Dimana:

Q_{gk} = daya dukung total kelompok tiang (kN)

Q_{tiang} = daya dukung tiang tunggal (kN)

n = jumlah tiang dalam satu kelompok tiang.

η = faktor efisiensi kelompok tiang (≤ 1).

2.12 Faktor Keamanan

Salah satu faktor yang perlu diperhatikan dalam desain pondasi adalah angka keamanan (*safety factor*). Angka keamanan adalah nilai pembagi *ultimet bearing capacity* untuk memperoleh kapasitas ijin (*allowable bearing capacity*). Persamaan angka keamanan dapat di hitung sebagai berikut:

$$SF = \frac{Q_{ijin}}{Q_{ultimit}} \quad 2.75$$

Dimana,

Q_{ijin} = daya dukung ijin (kN).

$Q_{ultimit}$ = daya dukung ultimit (kN)

SF = angka keamanan (*safety factor*)

Pada umumnya nilai angka keamanan yang digunakan dalam pondasi bangunan adalah variasi antara 2 hingga 4 atau dapat dilihat pada Tabel 2.14 dengan klasifikasi struktur dan kontrol.

Tabel 2. 14 Faktor aman yang disarankan (Reese & O'Neill, 1989)

Klasifikasi Struktur	Faktor Aman (F)			
	Kontrol Baik	Kontrol Normal	Kontrol Jelek	Control Sangat Jelek
Monumental	2,3	3	3.5	4
Permanen	2	2.5	2.8	3.4
Sementara	1.4	2.0	2.3	2.8

(Sumber: Hardiyatmo, 2008)

2.13 Penelitian Terdahulu

Tabel 2. 15 Daftar Penelitian Terdahulu

No	Nama pengarang	Judul skripsi	tujuan	Hasil
1	Diana Lumban Tobing (2019)	Analisis Daya Dukung Pondasi Bore Pile Pada Proyek Pembangunan Gedung Wahid Hasyim Apartmen Medan	mengetahui besar daya dukung pondasi bore pile dari data standart penetration test (SPT), mengetahui besar daya dukung kelompok tiang, dan mengetahui efisiensi kelompok tiang.	Nilai kapasitas daya dukung pondasi bore pile antar metode Mayerhoof dan metode Reese & Wright. dan efisiensi dengan metode conversi Labarre dan metoda Reseed & wright.
2	Yanuar Aditya Pratama (2019)	Analisa Perbandingan Kapasitas Daya Dukung Pondasi Bore Pile Dengan Menggunakan Metode Empiris Dan Dinamik Pada Proyek Jalan Tol Pandaan-Malang	Membandingkan hasil pengujian daya dukung pondasi tiang bore dari intrerpretasi pengujian PDA dengan perhitungan berdasarkan N-SPT.	Daya dukung bor Mayerhoof (1976), Aoki & De Alencar (1975), dan Bazara & Kurkur (1986) disarankan untuk mendesain daya dukung tiang bore pada tanah lempung. Metode Briaud & Tucker (1985), dan Lucia Decourt (1995) tidak disarankan mendesain tiang bore.
3	Rahmah Nur Afifa (2019)	Analisi Daya Dukung Bore Pile Pada Pembangunan Jembatan Kereta Api Antara Araskabu Dan Tebing Tinggi Dan Lintas Tebing Tinggi-Siantar	Mengetahui daya dukung ultimet pondasi tiang tunggal bore pile dari data SPT, membandingkan perhiungan daya dukung tiang tunggal bore pile dengan hasil pile driving analiyzer (PDA), mengetahui penurunan pada tiang tunggal.	Perbandingan hasil dengan menggunakan data SPT Metode Reseed & wright, metode Reese & O'Niel, dan pile driving analyser.

(Sumber: Hasil penelitian, 2022)

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Data Proyek Pelitian

Data proyek penelitian dari pembangunan jembatan layang Kereta Api Medan-Binjai adalah sebagai berikut:

Nama proyek	: Pembangunan Jalur Layang KA Lintas Medan-Binjai
Fungsi bangunan	: Jalan Layang Kereta Api
Satuan pekerjaan	: Balai Teknik Perkeretaapian Wilayah Sumatera Bagian Utara
Lokasi proyek	: Lintas Medan – Binjai, Kota Medan dan Kabupaten Deli Serdang, Provinsi Sumatera Utara – Medan (Kota)
Pemilik proyek	: Kementrian Perhubungan
Konsultan pengawas	: PT. Nindya Karya (persero) dan PT. Usaha Multi Guna
Konsultan penyelidikan tanah	: PT. Matra Bangun Technoconsult.

3.2 Lokasi Penelitian

Lokasi dan titik penelitian dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Peta lokasi penelitian
(Sumber: <https://earth.google.com/>)

3.3 Metode penelitian

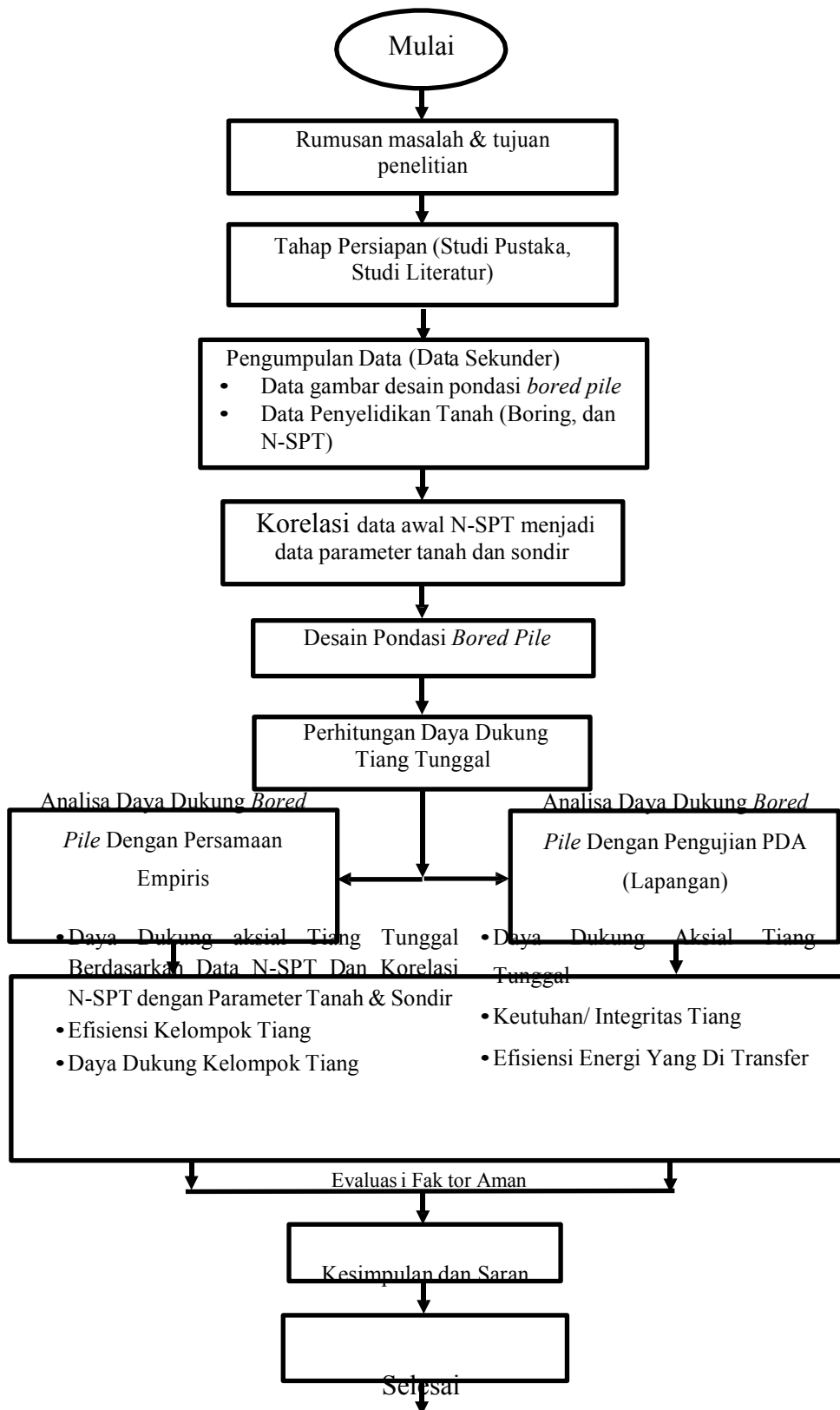
Metode yang digunakan dalam penelitian Tugas Akhir ini menggunakan metode analisis statis dan dinamis. Salah satu metode yang digunakan adalah Mayerhof (1976) tentang perhitungan daya dukung tiang khususnya *bored pile* berdasarkan data penyelidikan tanah (*soil investigation*).

Untuk memudahkan perhitungan dan kelengkapan kajian pustaka maka analisis data dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak (*software*) diantaranya adalah *Microsoft word office*, *Microsoft excel office*, dan beberapa literatur hingga referensi pustaka lainnya seperti buku dan jurnal yang berasal dari sumber terpercaya.

Data penelitian dibutuhkan terkhusus untuk proses perhitungan dimohonkan untuk pengambilan data kepada pihak kontraktor selaku pelaksana proyek. Data yang dikumpulkan untuk kebutuhan Tugas Akhir ini yaitu data sekunder diantaranya adalah data gambar pondasi, data hasil uji boring, data hasil N_{60} , dan data uji HSPLT/PDA Test.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan langkah-langkah yang sudah di jelaskan diatas, maka dapat di buat diagram alir peneltian seperti pada gambar 3.2 sebagai berikut:



Gambar 3. 2 Diagram alir
(Sumber: peneliti, 2023)