

2. TEORI PENUNJANG

2.1. Pengertian *Raft Foundation*

Menurut Bowles (1996), *raft foundation* berarti suatu pelat beton yang dimanfaatkan untuk menggabungkan antara satu kolom dengan kolom lainnya dalam beberapa baris. *Raft foundation* dibuat dari pelat beton bertulang dengan volume dan kekuatan besar yang mendukung kolom dan dinding struktur serta menyalurkan beban hingga ke bawah tanah atau tiang pancang. Terdiri dari pelat atau *raft* besar yang diletakkan di atas tanah dan ditopang oleh tiang pancang atau elemen fondasi lainnya.

Menurut Poulos & Small (2011), dengan keberadaan *piled raft foundation* memungkinkan adanya redistribusi beban dari *pile* yang paling terdampak ke *pile* yang kurang terdampak. *Raft foundation* dirancang untuk mendistribusikan beban dari bangunan secara merata ke seluruh tanah, mengurangi tekanan pada masing-masing *pile* dan meningkatkan stabilitas sistem fondasi secara keseluruhan. Sistem ini menguntungkan pada daerah dengan tanah lunak, karena dapat memberikan solusi fondasi yang lebih ekonomis dan efektif dibandingkan fondasi tiang pancang tradisional. Namun, *raft foundation* memiliki kelemahan yaitu masalah penurunan tanah yang besar sehingga memerlukan bantuan fondasi tiang untuk mengurangi penurunan yang terjadi.

2.2. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu yang masih relevan salah satunya adalah "*Numerical analysis for Deformational Behaviour of Different Length Piled Raft in Cohesive Soils.*" karya (Mohamed Ahmed et al., 2007). Pada penelitian tersebut Morsy et al. (2007) melakukan pengoptimalan suatu fondasi dari struktur tangki minyak dengan berat 3500 ton yang dibangun di Provinsi Riau, Sumatera, Indonesia. Dari beberapa percobaan pemodelan tiang pancang, didapatkan beberapa model desain yang paling optimal dimana desain tersebut membagi lokasi *pile* pancang menjadi dua zona, yaitu zona tengah dan zona tepi. Zona tengah memiliki *pile* pancang yang mencapai tahanan ujung, sedangkan pada *pile* di zona tepi lebih pendek daripada *pile* di zona tengah sehingga mengapung. Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa tidak semua tiang pancang harus menyentuh tanah keras, hanya zona tengahnya saja yang harus mencapai tanah keras. Selain itu, tiang pancang yang tidak mencapai bantalan dapat menggunakan *pile* berongga sehingga meningkatkan

kompresibilitas *pile* yang dapat mengurangi efek interaksi antar *pile* lainnya.

Jurnal terdahulu yang dapat membantu skripsi ini adalah “*3D Finite Element Analysis of The Effect of Raft Thickness, Pile Spacing, and Pile Length on the Behavior of Piled Raft Foundation.*” Karya (Cao et al., 2022). Ketika sebuah *raft foundation* tidak memenuhi suatu desain tertentu maka *pile* dapat digunakan untuk meningkatkan kekuatan fondasi dari segi *bearing capacity*, mengurangi penurunan tanah yang terjadi, dan mengurangi ketebalan fondasi (*raft*). Dalam penelitian ini parameter tanah dan material telah ditentukan dengan beban yang sama yaitu sebesar 205 kN/m^2 untuk menemukan suatu hasil yang seimbang sehingga hanya faktor- faktor seperti ketebalan *raft*, jarak *pile*, dan panjang *pile* saja yang menentukan dari hasil analisisnya. Ada 3 kasus yang diteliti dalam penelitian ini, tetapi dalam setiap kasus terdapat 3 sub kasus di dalamnya untuk mengoptimasi hal yang lainnya agar semua faktor diatas dapat teranalisis. Dari penelitian tersebut menurut Cao et al. (2022), mendapatkan beberapa kesimpulan yaitu, jarak antar *pile* berpengaruh sangat besar pada penurunan tanah maximum yang terjadi, ketebalan *raft* dapat berpengaruh pada penurunan yang terjadi namun ada suatu titik dimana dengan menambah ketebalan *raft* penurunan yang terjadi tidak berkurang banyak, dan desain panjang *pile* yang paling efisien adalah desain dengan *pile* yang diujung adalah *pile* yang paling pendek dan semakin panjang apabila semakin menengah.

2.3. Karakteristik Tanah

Dalam desain geoteknik karakteristik tanah sangat menentukan dalam perencanaan untuk menentukan fondasi yang akan digunakan. Setiap jenis tanah memiliki karakternya tersendiri terhadap beban atau kondisi lingkungan tertentu. Karakteristik dari tanah tersebut dipengaruhi oleh beberapa hal yaitu, tekstur tanah, struktur tanah, warna tanah, kandungan air tanah, dan lain-lain. Masing-masing jenis tanah seperti pasir, lempung, lanau memiliki spesifikasinya masing-masing dan sifatnya sendiri-sendiri yang akan menentukan dalam desain geoteknik.

Pertimbangan yang paling utama dari suatu karakteristik tanah adalah daya dukung tanah. Daya dukung tanah tersebut adalah kemampuan tanah untuk menahan beban struktural tanpa mengalami kegagalan. Dalam analisis Plaxis 2D, beberapa jenis-jenis parameter tanah yang dibutuhkan yaitu, kohesi tanah, berat jenis tanah (γ), koefisien permeabilitas, modulus elastisitas (E), sudut gesek (ϕ), sudut dilatasi (ψ), dan *poisson ratio* (ν). Untuk mendapatkan data- data tanah diatas perlu dilakukan uji dilokasi untuk mendapatkan data yang

sesuai sehingga hasil analisis dapat mendekati seperti analisis yang dilakukan.

Untuk mencari parameter-parameter tanah dari uji SPT perlu dilakukan *trial and error* dari analisis Plaxis 2D dengan hasil dari uji tes tarik dan *static loading test* di lapangan. Sebagai dasar untuk *trial and error* yang dilakukan diperlukan adanya referensi parameter tanah dari uji SPT sebagai acuan agar hasil yang didapat tidak melenceng jauh dan mendapatkan hasil dengan *error* sekecil mungkin. Berikut adalah beberapa referensi-referensi yang dapat digunakan untuk mendapatkan parameter tanah.

2.3.1. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas, juga dikenal sebagai *modulus Young*, adalah ukuran kekakuan atau kekenyalan suatu material. Ini adalah salah satu parameter penting dalam mekanika bahan yang menggambarkan seberapa banyak material akan mengalami deformasi di bawah tegangan tertentu. Modulus elastisitas mengukur kemampuan material untuk menahan deformasi elastis ketika dikenai tegangan. Semakin tinggi nilai modulus elastisitas suatu material, semakin kaku material tersebut, dan semakin kecil deformasi yang akan terjadi di bawah tegangan yang diberikan.

Kulhawy dan Mayne (1990) menyatakan bahwa nilai N_{SPT} tanah jenis pasir bergantung pada faktor yang belum teruji pada studi khusus yang menyebabkan nilai modulus elastisitas sangat bervariasi. Karena itu Kulhawy dan Mayne mengusulkan pendekatan awal sebagai berikut:

$$\frac{E}{Pa} = 5 \times N_{SPT} \quad (\text{Untuk pasir halus}) \quad (2.1)$$

$$\frac{E}{Pa} = 10 \times N_{SPT} \quad (\text{Untuk } \textit{clean normally consolidated sand}) \quad (2.2)$$

$$\frac{E}{Pa} = 15 \times N_{SPT} \quad (\text{Untuk } \textit{clean overconsolidated sand}) \quad (2.3)$$

Keterangan:

E = Modulus Elastisitas (kN/m^2)

Pa = Tekanan Udara Standar (100 kN/m^2)

N_{SPT} = Jumlah pukulan untuk penetrasi tabung

Schmermann (1970) menyatakan bahwa modulus elastisitas tanah dapat diperoleh menggunakan korelasi nilai dari data pengujian N_{SPT} sebagai berikut:

Untuk Tanah Jenis Pasir

$$E_s (\text{kN/m}^2) = 766 \times N_{SPT} \quad (2.4)$$

Untuk Tanah Jenis Lempung

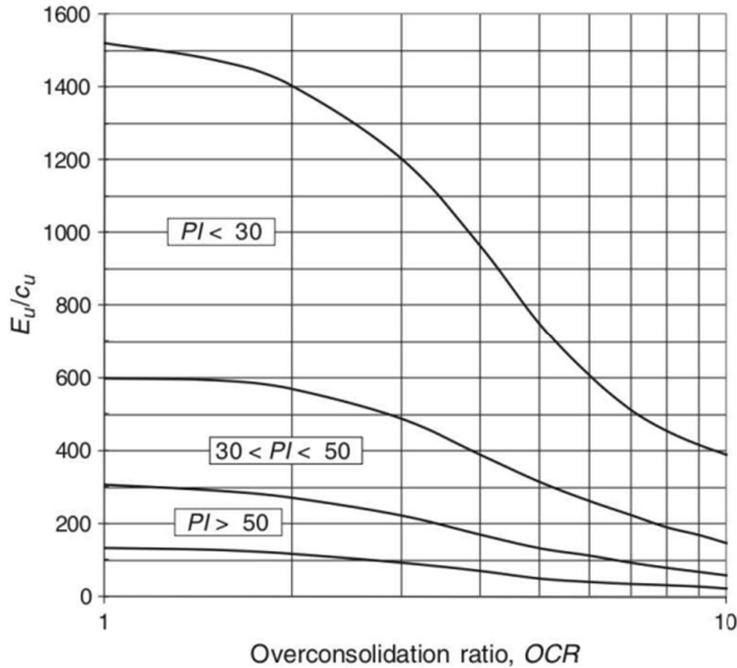
Normally Consolidated Clay (NC)

$$E_u \text{ (kN/m}^2\text{)} = 250 \times (C_u) - (500 \times C_u) \quad (2.5)$$

Over consolidated Clay (OC)

$$E_u \text{ (kN/m}^2\text{)} = 750 \times (C_u) - 1000 \times (C_u) \quad (2.6)$$

C_u = kohesi lempung pada kondisi undrained.



Gambar 2.1 Hubungan antara E_u/C_u –PI–OCR Untuk Lempung (Duncan dan Buchigani (1976) dan U.S Army (1994))

Sumber: Warman, R.S. (2019). Kumpulan Korelasi Parameter Geoteknik dan Fondasi. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga, p. 40.

Melalui Gambar 2.1 dapat diambil kesimpulan untuk nilai modulus elastisitas dari tanah lempung dapat didapat melalui nilai PI (*plasticity index*) dengan *range-range* dari grafik tersebut. *Plasticity index* bisa didapat melalui tes *atterberg limit* dengan mencari *liquid limit* dan *plastic limit* dari tanah tersebut. Selisih dari kedua parameter tersebut merupakan nilai dari PI itu sendiri.

2.3.2. Berat Jenis Tanah

Berat jenis tanah merupakan ukuran yang digunakan untuk menggambarkan berat suatu jenis tanah per satuan volume tertentu. Ini adalah salah satu sifat fisik yang penting dalam ilmu tanah dan geoteknik, karena dapat memberikan informasi tentang karakteristik

dan perilaku tanah. Berat jenis tanah terdiri terdapat dua kondisi yaitu *dry* dan *saturated*. Untuk mendapatkan besar berat jenis bisa melihat acuan korelasi nilai N_{SPT} dengan berat jenis tanah pada Tabel 2.1 untuk pasir dan Tabel 2.2 untuk lempung.

Tabel 2.1 Tabel Korelasi antara nilai N terkoreksi untuk D_r , ϕ , dan γ (Pasir)

Deskripsi	Sangat Lepas	Lepas	Sedang	Padat	Sangat Padat
Kerapatan Relatif (D_r)	0-0.15	0.15-0.35	0.35-0.65	0.65-0.85	0.85-1.00
Nilai N' -SPT terkoreksi	0-4	4-10	10-30	30-50	>50
Sudut geser dalam (ϕ)($^\circ$)	25-30	27-32	30-35	35-40	38-43
Berat volume tanah (γ) (kN/m ³)	11.0-15.7	14.1-18.1	17.4-20.4	17.3-22	20.4-23.6

Sumber: Warman, R.S. (2019). Kumpulan Korelasi Parameter Geoteknik dan Fondasi. Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga, p. 45.

Tabel 2.2 Tabel Korelasi antara nilai N Terkoreksi untuk γ (Lempung)

Consistency	Unconfined Compression Strength q_u (kN/m ²)	N_{SPT} (blows per ft)	Saturated Unit Weight (kN/m ³)
Very Soft	0-25	0-2	< 16
Soft	25-50	2-4	16 - 19
Medium	50-100	4-8	17 - 20
Stiff	100-200	8-15	18 - 20
Very Stiff	200-400	15-30	19 - 22
Hard	> 400	> 30	> 20

Sumber: Lambe & Whitman dalam Leon, D., & Widya, B. (2011). Stabilitas Tebing Pada Proyek Jalan Tol Semarang – Ungaran STA 6+000 Sampai STA 6+250. Universitas Diponegoro, p. 16.

2.3.3. Sudut Gesek

Sudut gesek tanah adalah sudut di antara permukaan tanah dan bidang horizontal di mana tanah akan mulai bergerak atau bergeser saat diberi gaya geser. Untuk mendapatkan sudut gesek tanah bisa melihat acuan korelasi nilai N_{SPT} dengan sudut geser pada Tabel 2.1.

Hatanaka dan Uchida (1996) menyatakan bahwa sudut gesek tanah dapat diperoleh menggunakan korelasi nilai dari data pengujian N_{SPT} sebagai berikut:

$$\phi = \sqrt{20 \times (N_{SPT})} + 20 \quad (2.7)$$

Wolff (1989) menyatakan bahwa sudut gesek tanah dapat diperoleh menggunakan korelasi nilai dari data pengujian N_{SPT} sebagai berikut:

$$\phi = 27,1 + 0,3N_{SPT} - 0,00054N_{SPT}^2 \quad (2.8)$$

2.3.4. Sudut Dilatasi

Sudut dilatasi adalah sudut yang menunjukkan pengembangan volume tanah saat terkena tegangan geser. Sudut dilatasi bergantung dari kepadatan dan sudut gesek tanah (ϕ) pada tanah pasir. Apabila sudut gesek tanah besarnya kurang dari 30° , maka sudut dilatasi bernilai 0.

Sudut dilatasi dapat dicari melalui persamaan berikut:

$$\psi = \phi - 30^\circ \quad (2.9)$$

2.3.5. Kohesi

Kohesi tanah merupakan kemampuan tanah untuk saling melekat satu sama lain pada suatu bidang tertentu. Secara umum tanah terbagi menjadi 2 tipe yaitu *cohesive* dan *cohesionless soil*. Untuk nilai kohesi tanah dapat mengacu pada Tabel 2.3 korelasi antara N_{SPT} dengan kohesi tanah.

Tabel 2.3 Korelasi antara nilai N_{SPT} terkoreksi untuk C_u (Terzaghi dan Peck, 1967)

Konsistensi	N_{SPT}	C_u (kN/m ²)
Sangat Lunak	0 - 2	< 12
Lunak	2 - 4	12 - 25
Sedang	4 - 8	25 - 50
Kaku	8 - 15	50 - 100
Sangat Kaku	15 - 30	100 - 200
Keras	> 30	> 200

Sumber: Warman, R.S. (2019). Kumpulan Korelasi Parameter Geoteknik dan Fondasi. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga, p. 45.

Bowles (1988), menyatakan bahwa kohesi tanah dapat diperoleh menggunakan korelasi nilai dari data pengujian N_{SPT} sebagai berikut:

$$C_u \text{ (kN/m}^2\text{)} = 6 \times N_{SPT} \quad (2.10)$$

Stroud (1974) , menyatakan bahwa kohesi tanah dapat diperoleh menggunakan korelasi nilai dari data pengujian N_{SPT} sebagai berikut:

$$C_u \text{ (kN/m}^2\text{)} = K \times N_{SPT} \quad (2.11)$$

$$K = 3,5 - 6,5 \quad (\text{kN/m}^2)$$

$$K \text{ rata-rata} = 4,40 \quad (\text{kN/m}^2)$$

Hara et al. (1971), menyatakan bahwa kohesi tanah dapat diperoleh menggunakan korelasi nilai dari data pengujian N-SPT sebagai berikut:

$$C_u \text{ (kN/m}^2) = 29 \times N_{SPT}^{0,72} \quad (2.12)$$

2.3.6. Poisson's Ratio

Nilai *poisson ratio* ditentukan sebagai rasio kompresi poros terhadap regangan pemuaian lateral. Untuk mendapatkan nilai *poisson ratio* tanah bisa mengacu pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Tabel hubungan jenis tanah dengan *poisson ratio* (ν)

Material	Poisson's ratio
Lempung jenuh (<i>undrained</i>)	0.5
Lempung jenuh (<i>drained</i>)	0.2-0.4
Pasir rapat	0.3-0.4
Pasir lepas	0.1-0.3
Loess	0.1-0.3
Es	0.36
Alumunium	0.35
Baja	0.29
Beton	0.15

Sumber: Warman, R.S. (2019). Kumpulan Korelasi Parameter Geoteknik dan Fondasi. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga, p. 45.

2.4. Penurunan Tanah

Penurunan tanah dalam geoteknik merupakan pergerakan tanah secara vertikal ke bawah akibat adanya perubahan tegangan dari pemberian beban langsung dan tidak langsung ke tanah. Meningkatnya tekanan akan menyebabkan tanah terkompres dan tekanan air pori akan mendadak meningkat juga yang menyebabkan tanah mengalami pergerakan vertikal. Dalam SNI 8460 tahun 2017, penurunan izin maksimum suatu bangunan ditetapkan harus lebih kecil dari $15 \text{ cm} + B/600$ (B adalah bentang pendek bangunan). Untuk beda penurunan diizinkan sebesar $l/300$ (l adalah panjang 2 titik yang ditinjau). Penurunan tanah ini terdiri dari tiga komponen utama yaitu:

1. *Immediate Settlement*. *Immediate settlement* terjadi langsung setelah beban terjadi atau setelah masa konstruksi selesai.
2. *Consolidation Settlement (Primary Consolidation)*. *Consolidation settlement* terjadi karena pengeluaran air secara bertahap akibat adanya tegangan yang terus menerus

terjadi.

3. *Creep Settlement (Secondary Consolidation)*. *Creep settlement* terjadi karena adanya tegangan yang konstan terjadi terus menerus dan adanya perubahan unsur-unsur partikel dalam tanah.

2.5. Basis Teori Plaxis 2D

Plaxis 2D adalah program elemen hingga dalam batasan dua dimensi yang dapat digunakan untuk melakukan analisis deformasi, stabilitas, dan aliran pada berbagai jenis aplikasi geoteknik. Kondisi di kenyataan dapat dimodelkan dengan baik oleh pemodelan tipe model *plane strain* dan model *axisymmetric*.

Dalam analisis menggunakan Plaxis 2D, model tanah yang digunakan adalah model *Mohr-Coulomb*. Model ini menggambarkan sifat-sifat mekanik tanah seperti kekuatan geser, sudut geser dalam bentuk parameter-parameter material yang terkait. Penggunaan 15 nodal dalam satu segitiga elemen hingga memungkinkan representasi yang cukup akurat dari deformasi dan respon tanah terhadap beban vertikal batas yang diterapkan pada fondasi.

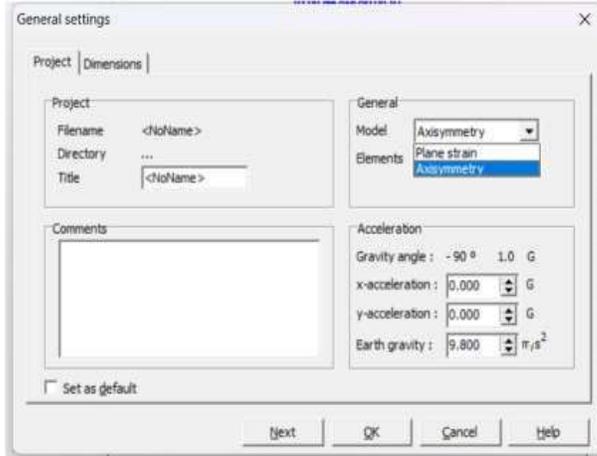
2.5.1. Penggunaan Plaxis 2D

Langkah pertama dalam analisis fondasi, menentukan koordinat titik-titik pada geometri garis dan menghubungkannya satu sama lain. Kemudian, menginput data material tanah berdasarkan data yang telah tersedia dan data material *raft* dan *pile* ditentukan oleh pengguna sesuai kebutuhan dalam penelitian. Setelah itu, lakukan penugasan material ke elemen-elemen yang telah dibuat dan masukkan juga pembebanan di dalam pemodelan. Dalam pemodelan antara *pile* dan tanah diperhatikan dengan cermat. *Standard Fixities* dan *mesh* dari perangkat lunak diperbarui, dan kondisi awal ditetapkan. Memasukkan data elevasi muka air tanah sehingga tekanan air yang dihasilkan sesuai dengan setiap tahap analisis. Setelah semua parameter ditetapkan, perhitungan dilakukan dan hasilnya dievaluasi. Output yang dihasilkan mencakup deformasi, tegangan, dan perubahan *settlement* pada setiap tahap analisis.

2.5.2. Model *Plane Strain* dan *Axisymmetric*

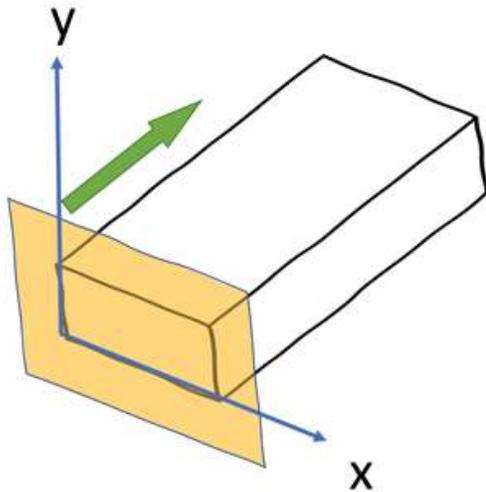
Dalam Plaxis 2D terdapat 2 pilihan model yang digunakan untuk analisis yaitu model *axisymmetric* dan *plane strain* seperti pada Gambar 2.2. Kedua model ini memiliki perbedaan dari segi bagaimana analisisnya dilakukan. Masing-masing model memiliki

kegunaan untuk jenis kasus yang berbeda-beda.



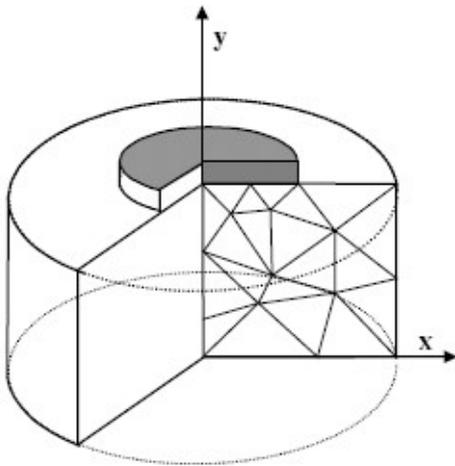
Gambar 2.2 Pemilihan model *plane strain* dan *axisymmetric*

Model *plane strain* mengasumsikan model yang dibuat memiliki panjang yang tak hingga. Dalam *plane strain* juga mengasumsikan deformasi yang terjadi hanya pada sumbu x dan y sedangkan deformasi sumbu z nya sebesar nol. Model ini cocok digunakan untuk kondisi tanah yang elemen tanahnya sangat lebar dan panjang.



Gambar 2.3 Model analisis *plane strain*

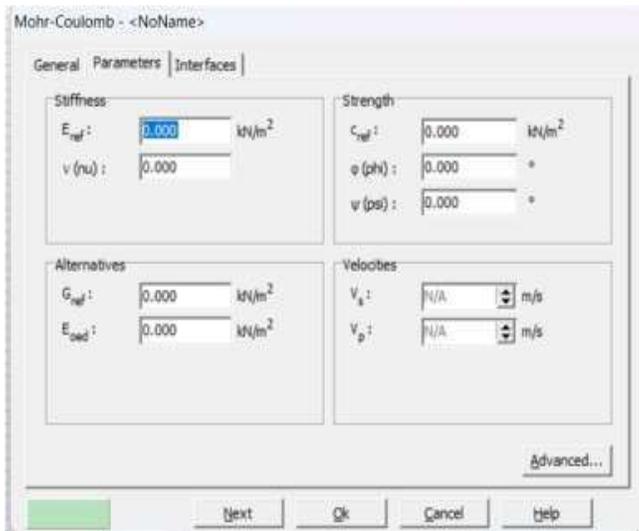
Model *axisymmetric* mengasumsikan bahwa sebuah model dapat dicirikan oleh rotasi aksial di sekitar suatu sumbu (sumbu z). Dengan kata lain, bentuk dan beban dapat diulang dalam semua arah melalui rotasi aksial. Model ini cocok untuk digunakan pada model yang memiliki simetri aksial, dan memungkinkan rotasi aksial dalam satu sumbu. Biasanya digunakan untuk analisis model geometri yang simetris seperti fondasi silinder.



Gambar 2.4 Model analisis *axisymmetric*

2.5.3. Model *Mohr-Coulomb*

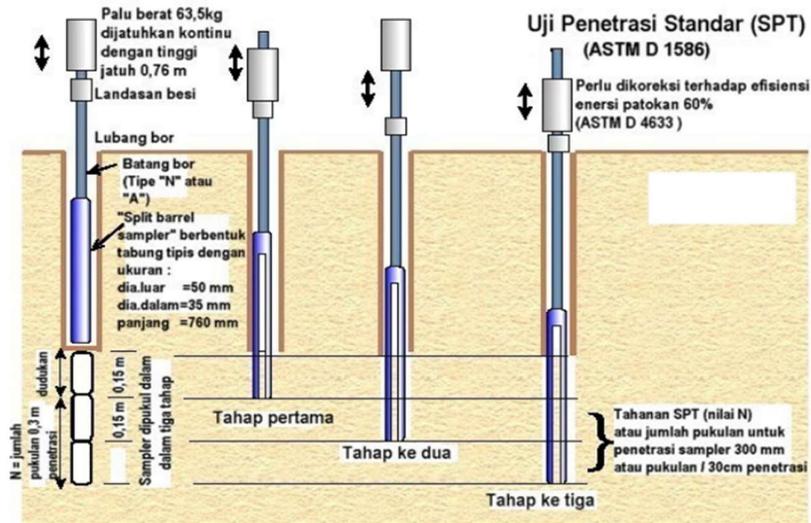
Model *Mohr-Coulomb* adalah model parameter tanah yang digunakan pada Plaxis 2D sesuai dengan data-data yang diambil dari uji tanah. Model ini didasarkan pada beberapa parameter yaitu, kohesi tanah(c), berat jenis tanah(γ), koefisien permeabilitas, *Young's modulus*(E), sudut gesek(ϕ), sudut dilatasi(Ψ), dan *Poisson ratio*(ν) sesuai dengan Gambar 2.5. Nilai-nilai ini menentukan respons tanah terhadap beban dan kondisi batas tertentu dalam model numerik.



Gambar 2.5 Input parameter tanah model *Mohr-Coulomb*

2.6. Standard Penetration Test

Standard penetration test (SPT) adalah metode pengujian lapangan yang digunakan untuk mencari karakteristik fisik tanah dan kekuatan tanah. Menurut Wazoh dan Mallo (2014), untuk keamanan dan faktor ekonomis dari pembangunan bangunan, diperlukan untuk kondisi tanah untuk diinvestigasi secara layak untuk membantu proses desain dan proses konstruksi itu sendiri.



Gambar 2.6 Model *standard penetration test* sesuai dengan standar ASTM.

Sumber: Warman, R.S. (2019). Kumpulan Korelasi Parameter Geoteknik dan Fondasi. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga, p. 45.

2.7. Static Loading Test

Static loading test mengecek kapasitas suatu *pile* dengan beban yang terjadi atau lebih besar. Tes ini berfungsi untuk mengecek kapasitas *pile* tersebut apakah sudah mencapai kapasitas yang direncanakan. Terdapat dua jenis tes yang bisa dilakukan pada *pile* tersebut yaitu tes tarik, tes tekan, dan tes gaya lateral untuk mengecek masing-masing daya dukung *pile* tersebut terhadap gaya tarik dan gaya tekan. Tujuan dari dilakukannya *static loading test* di lapangan adalah memverifikasi kapasitas beban *pile* yang terpasang lebih besar dari tahanan nominal yang digunakan dalam proses desain.