

BAB 3

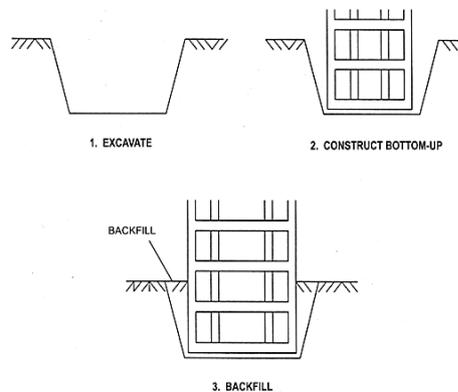
LANDASAN TEORI

3.1 Pekerjaan Galian

Sebuah konstruksi *basement* tidak akan bisa dilepaskan dari pekerjaan galian tanah karena *basement* merupakan struktur bangunan yang berada di bawah tanah. Pekerjaan galian tanah adalah sebuah proses pemindahan suatu bagian permukaan tanah dari satu lokasi ke lokasi lainnya, dan akhirnya terbentuk sebuah kondisi fisik permukaan tanah yang baru (Sain & Quinby, 1996). Dalam pekerjaan galian yang harus diperhatikan adalah kestabilan dinding galian. Selain itu, dalam hal konstruksi yang menggunakan dinding penahan atau sistem turap tersebut harus diperhatikan secara sistematis untuk mengetahui adanya perpindahan, kondisi material yang tetap terjaga, dan celah antar turap yang bebas rembesan air (Suastino et al., 2023). Terdapat beberapa metode galian *basement*, diantaranya:

a. Metode *Open-Cut*

Metode ini sering disebut sebagai metode konvensional, yang merupakan pendekatan yang paling sederhana dalam konteks pelaksanaan konstruksi. Dalam metode ini, penggalian dilakukan dari permukaan tanah hingga ke dasar galian dengan sudut lereng galian tertentu tanpa keterlibatan *retaining wall*. Selanjutnya, konstruksi *basement* dilakukan dari dasar galian ke permukaan tanah dengan pendekatan dari bawah ke atas (*bottom-up*). Setelah selesai, lubang galian dapat diisi kembali atau diurug (Fitri & Cahyono, 2015).

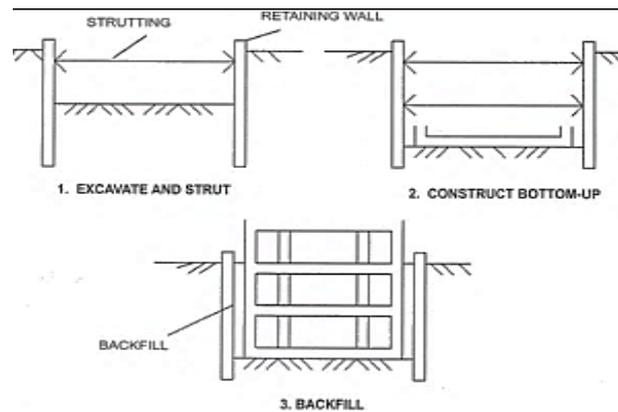


Gambar 3.1 Metode *Open-Cut*

(Sumber: Chew 2009)

b. Metode *Cut and Cover*

Berbeda dengan teknik *open cut*, dalam metode ini, sebelum melibatkan proses penggalian, dinding penahan tanah dipasang di sekitar area galian. Setelah dinding penahan tanah terpasang, proses ekskavasi dilakukan mulai dari permukaan tanah (*ground level*) hingga mencapai dasar galian. Konstruksi *basement* kemudian dilaksanakan dari dasar galian menuju permukaan tanah dengan metode dari bawah ke atas (*bottom-up*).



Gambar 3.2 Metode *Cut and Cover*

(Sumber: Chew, 2009)

c. Metode *Top-Down*

Mirip dengan metode *cut and cover*, dalam metode ini sebelum tahap penggalian dan konstruksi *basement* dimulai, *retaining wall* dipasang terlebih dahulu di sekitar area galian, Sama seperti pada metode *open cut* dan *cut and cover*, konstruksi *basement* diterapkan dari dasar galian hingga ke permukaan tanah. Berbeda dengan metode *open cut* dan *cut and cover*, pada metode *top-down*, proses konstruksi *basement* dimulai dari level permukaan tanah (*ground level*) dan berlanjut hingga mencapai lantai dasar *basement* terdalam. Dengan menerapkan metode konstruksi *top-down*, struktur bawah dapat dikerjakan secara bersamaan dengan struktur atas. Pekerjaan pada struktur bawah mencakup penggalian, penulangan, dan pengecoran pada plat lantai *basement*, kolom *basement*, *pile cap*, serta *sloof* (Wadino et al., 2018).

d. Metode *Buttom-Up*

Dalam metode ini, pembangunan struktur dilakukan setelah seluruh pekerjaan penggalian selesai mencapai elevasi yang direncanakan. Pertama, pelat

basement paling bawah dicor, kemudian pembangunan *basement* dilanjutkan dari bawah ke atas dengan menggunakan *scaffolding*. Kolom, balok, dan pelat dicor di tempat (*cast in place*). Penggalian tanah dapat dilakukan dengan metode *open cut* atau menggunakan sistem dinding penahan tanah yang bisa bersifat sementara maupun permanen. Sistem dinding penahan tanah dapat diperkuat dengan *strutting*, *ground anchor*, atau *free cantilever*. Untuk pekerjaan *dewatering*, umumnya digunakan sistem *predrainage* (Fitri & Cahyono, 2015).

3.2 Dinding Penahan Tanah (*Retaining Wall*)

Dinding penahan atau dikenal sebagai *retaining walls* dalam konteks rekayasa struktural, merupakan struktur konstruksi yang diimplementasikan dengan tujuan memberikan stabilitas terhadap tanah atau material lain yang tidak memiliki kemiringan alami. Fungsinya melibatkan penahan dan penopangan terhadap massa tanah, timbunan tanah, batu bara atau biji-tambang, serta mengelola aliran air. Bangunan ini biasa digunakan untuk menopang tanah, timbunan dan lain sebagainya. Dalam berbagai cara, dinding dapat mengalami keruntuhan, dan setiap metode keruntuhan memerlukan evaluasi mendalam serta pemilihan faktor keamanan yang cermat. Terdapat tiga potensi mekanisme keruntuhan yang patut diperhatikan:

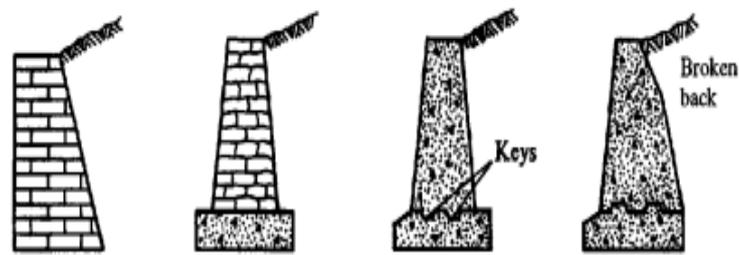
- a. Dinding mungkin mengalami pergeseran horizontal (keruntuhan geser)
- b. Dinding mungkin mengalami kejadian terguling (keruntuhan guling)
- c. Kapasitas dukung tanah yang memegang dinding dapat terlampaui, khususnya di daerah tumit dinding dimana tekanan pada tanah mencapai puncaknya (keruntuhan daya dukung).

Adapun jenis-jenis dinding penahan tanah yaitu :

a. Dinding Gravitasi (*Gravity Wall*)

Dinding ini biasanya dibuat dari beton murni (tanpa tulangan) atau dari pasangan batu kali. Tulangan beton yang minim sesekali disematkan pada dinding bertujuan untuk menghindari potensi retakan permukaan yang timbul akibat fluktuasi suhu. Dalam perencanaan struktur tembok penahan tipe

gravitasi, harus tidak terjadi tegangan tarik pada setiap irisan badannya. Stabilitas konstruksi diperoleh hanya dengan mengandalkan berat sendiri.

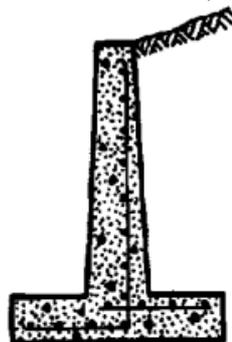


Gambar 3.3 *Gravity Wall*

(Sumber: Joseph E Bowles, 1999)

b. Dinding Kantilever (*Cantilever Wall*)

Dinding Kantilever dibuat dari beton bertulang yang tersusun dari suatu dinding vertikal dan tapak lantai. Masing-masing berperan sebagai balok atau pelat Kantilever. Dinding ini menggunakan prinsip aksi konsol yang bertujuan untuk menahan massa yang terletak di belakang dinding dari kemiringan alami yang terjadi. Stabilitas konstruksi diperoleh dari berat sendiri dinding penahan dan berat tanah di atas tumit tapak (*hell*). Terdapat 3 bagian struktur yang berfungsi sebagai Kantilever, yaitu bagian dinding vertikal (*steem*), tumit tapak dan ujung kaki tapak (*toe*) (Lisman et al., 2020).



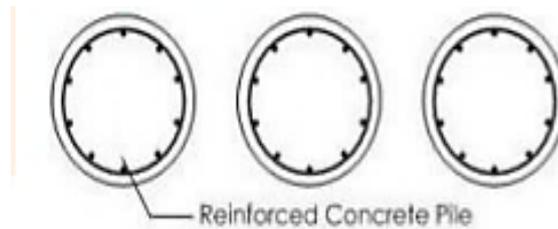
Gambar 3.4 *Kantilever Retaining Wall*

(Sumber: Joseph E Bowles. 1999)

c. *Soldier Pile*

Dinding penahan tanah yang terdiri dari rangkaian atau barisan *bored pile* yang terbuat dari beton. Barisan tiang tersebut saling memotong sehingga jarak as ke asnya lebih kecil dari diameter tiang, dimana tiang yang terpotong tidak menggunakan tulangan (*soft pile*) dan yang memotong menggunakan tulangan

(*hard pile*) untuk menahan momen atau gaya geser. Tujuan dari pada pembuatan *soldier pile* ini adalah sebagai penahan tanah dan menerima atau menahan gaya beban horisontal yang ditimbulkan dari tekanan tanah ataupun air yang ditahan di sebelahnya. Kedalaman dan diameter *soldier pile* tergantung dari perhitungan kekuatan dan jenis tanah. Sebagai struktur penahan tanah, *soldier pile* dapat digunakan di berbagai jenis tanah (Perko & Boulden, 2008).

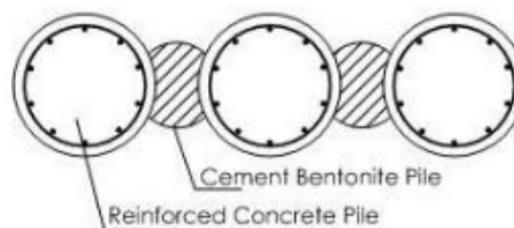


Gambar 3.5 *Soldier pile Retaining Wall*

(Sumber: SNI 8460-:2017)

d. *Contiguous Bored Pile*

Contiguous bored pile (CBP) adalah struktur dinding penahan tanah yang terdiri dari serangkaian *bored pile* dan *bentonite cement pile* yang terhubung satu sama lain. Struktur ini bersifat sementara dan memiliki kemampuan tahan air. *Bored pile* dan *bentonite* sering digabungkan dengan sistem angkur untuk meningkatkan kemampuan mereka dalam menahan tekanan lateral dari tanah dan untuk sebagai pemutus aliran air tanah di bawah permukaan (*cut off*).



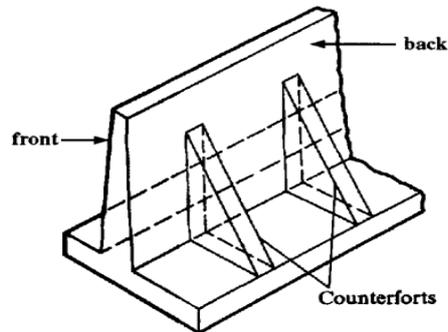
Gambar 3.6 *Contiguous Bored Pile*

(Sumber: SNI 8460-:2017)

e. Dinding Kontrafort (*Counterfort Wall*)

Dinding kontrafort mirip dengan dinding kantilever. Namun perbedaannya terletak pada penggunaannya untuk menopang konsol yang lebih panjang atau menanggung tekanan yang sangat tinggi di belakang dinding. Dinding ini

memiliki pertebalan belakang yang menyatukan dinding dengan dasarnya, dibangun pada interval-interval sepanjang dinding untuk mengurangi momen-momen lentur dan geser.



Gambar 3.7 *Cantilever Retaining Wall*

(Sumber: Joseph E Bowles, 1999)

f. Dinding *Butters* (*Butters Wall*)

Dinding ini hampir sama dengan dinding kontrafort, hanya bedanya bagian kontrafort diletakkan di depan dinding. Dalam hal ini, struktur kontrafort berfungsi memikul tegangan tekan. Pada dinding ini, bagian tumit lebih pendek daripada bagian kaki. Stabilitas konstruksinya diperoleh dari berat sendiri dinding penahan dan berat tanah di atas tumit tapak.

g. *Abutment* Jembatan (*Bridge Abutment*)

Struktur ini berfungsi seperti dinding penahan tanah yang memberikan tahanan horizontal dari tanah timbunan di belakangnya. Pada perencanaannya, struktur dianggap sebagai balok yang dijepit pada dasar dan ditumpu bebas pada bagian atasnya.

h. Dinding Turap

Berdasarkan material yang digunakan dikenal beberapa macam dinding turap sesuai dengan material yang digunakan yaitu dinding turap baja, kayu, dan beton.

i. *Box Culvert*

Box culvert dapat dibuat dengan satu atau dua lubang, dan berfungsi sebagai portal kaku tertutup yang dapat menahan tekanan tanah lateral dan beban vertikal.

3.3 Tekanan Tanah Lateral

Berbeda dengan struktur gedung yang menerima beban horizontal dalam jangka waktu pendek (sementara), struktur penahan tanah seperti pangkal jembatan, turap, dinding *diaphragm*, penahan tanah, pilar-pilar jembatan menerima beban horizontal sepanjang bangunan tersebut berdiri (tetap). Selain itu, dalam wilayah yang rentan terhadap gempa bumi, bangunan penopang tanah dapat mengalami beban lateral yang lebih signifikan akibat getaran seismik. Dalam beberapa situasi, penetapan permasalahan dapat sangat bervariasi bergantung pada kondisi tanah, serta merupakan hasil dari defleksi dan deformasi dari strukturnya. Meskipun begitu, apabila struktur penahan tanah tidak mengalami deformasi, sebagaimana yang terjadi pada abutmen dari suatu *basement*, teori-teori lama seperti Coulomb (1773), Rankine (1857), Terzaghi (1941), Terzaghi dan Peck (1967) menjadi tidak relevan (Kusuma et al., 2019).

3.4 Analisis Deformasi

Deformasi merujuk pada perubahan bentuk, posisi, dan dimensi objek, seperti dinding penahan tanah yang dapat terjadi akibat tekanan dari tanah atau air sehingga mengakibatkan perpindahan atau lendutan pada dinding penahan tanah. Gaya yang berasal dari tekanan tanah dapat dilihat dari perspektif tekanan lateral tanah dalam kondisi istirahat, aktif, dan pasif. Kondisi tekanan lateral ini menghasilkan gaya horizontal pada struktur dinding penahan tanah yang dapat mengakibatkan deformasi pada struktur tersebut. Dalam perencanaan setiap galian, diperlukan perhitungan analisis stabilitas untuk mencegah potensi keruntuhan dinding penahan tanah akibat tekanan tanah yang tidak memadai. Hasil analisis stabilitas ini akan mempengaruhi evaluasi deformasi dinding penahan tanah, yang dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti lebar galian, kedalaman galian, faktor keamanan, kedalaman penetrasi dinding penahan tanah, kekakuan penyangga, dan elemen-elemen lainnya.

3.5 Parameter Tanah

Parameter tanah yang dimaksudkan disini meliputi *modulus young*, *poisson ratio*, sudut geser dalam, dan kohesi.

- a. Berat Volume Tanah (γ)

Berat volume tanah adalah rasio berat dengan volume tanah. Pada Plaxis, di *input* kan nilai berat volume jenuh (γ_{sat}) dan berat volume jenuh sebagian (γ_{unsat}). Berat volume jenuh adalah berat volume tanah dalam keadaan jenuh, sedangkan berat volume jenuh sebagian adalah berat volume tanah saat udara pada tanah keluar. Untuk menentukan γ_{sat} , cara yang digunakan adalah mengorelasikan nilai N-SPT dengan Tabel 3.1. Selanjutnya, untuk menentukan γ_{dry} , dilakukan dengan menghubungkan nilai γ_{sat} yang telah diperoleh sebelumnya dengan Tabel 3.3 Adapun untuk memperoleh nilai γ_{unsat} , digunakan pendekatan dengan mengambil nilai tengah antara γ_{sat} dan γ_{dry} .

Tabel 3.1 Korelasi N-SPT dengan γ_{sat} untuk Tanah Kohesif

N-SPT	Consistency	qu (kPa)	γ_{sat} (kN/m ³)
< 2	Very Soft	<25	16-19
2-4	Soft	25-50	16-19
4-8	Medium Stiff	50-100	17-20
8-15	Stiff	100-200	19-22
15-30	Very Stiff	200-400	19-22
>30	Hard	>400	19-22

(Sumber: Terzaghi and Peck, 1948)

Tabel 3.2 Korelasi N-SPT dengan γ untuk Tanah Non kohesif

Desription	Very Loose (kN/m ³)	Loose (kN/m ³)	Medium (kN/m ³)	Dense (kN/m ³)	Ver Dense (kN/m ³)
Fine	1-23	3-6	7-15	16-30	
Medium	2-3	4-7	8-20	21-40	>40
Coarse	3-6.	5-9	10-25	26-45	>45
γ_{sat}	11-16	14-18	17-20	17-22	20-23

(Sumber: Whilliam T, Whitman, Robert V, 1962)

Tabel 3.3 Korelasi Antara γ_{sat} dan γ_{dry}

γ_{dry}		e	n	W _{sat} %	γ_{sat} g/cm ²
g/cm ³	lb.cb.ft				
0,50	31,25	4,4	0,8	163	1,31
0,60	37,50	3,5	0,78	129,6	1,38
0,70	43,75	2,86	0,74	105,8	1,44
0,8	50,00	2,38	0,7	88	1,5
0,90	56,25	2	0,67	74,1	1,57
1,00	62,50	1,7	0,63	63	1,63

1,10	68,75	1,45	0,59	53,9	1,69
1,20	75,00	1,25	0,56	46,3	1,76
1,30	81,25	1,08	0,52	39,9	1,82
1,40	87,50	0,93	0,48	34,4	1,88

b. Permeabilitas

Permeabilitas dapat diartikan sebagai karakteristik material berpori yang memungkinkan pergerakan fluida dari suatu tempat ke tempat lain melalui saluran pori-pori. Dengan demikian, aliran air akan terjadi dari wilayah dengan tingkat energi lebih tinggi ke wilayah dengan pori-pori yang memiliki tingkat energi lebih rendah.

Tabel 3.4 Korelasi Jenis Tanah dengan Nilai Permeabilitas

Jenis tanah	K	
	cm/dtk	ft/mnt
Kerikil bersih	1,0 – 100	2,0 – 200
Pasir kasar	1,0 – 0,01	2,0 – 0,02
Pasir halus	0,01 – 0,001	0,02 – 0,002
Lanau	0,001 – 0,0001	0,002 – 0,00002
Lempung	<0,000001	<0,000002

(Sumber: Braja M Das, 1995)

c. Kohesi

Kohesi merupakan gaya tarik antar partikel tanah. Bersama dengan sudut geser dalam, kohesi merupakan parameter kuat geser tanah yang menentukan ketahanan tanah terhadap deformasi akibat tegangan yang bekerja pada tanah dalam hal dalam hal ini berupa gerakan lateral tanah (Sorensen et al., 2013).

Tabel 3.5 Korelasi Kohesi dengan Konsistensi Tanah untuk Tanah Lempung

Konsistensi	Taksiran harga kekuatan geser undrained, C_u (kPa)	Taksiran harga N-SPT
Sangat lunak (<i>very soft</i>)	0 – 12,5	0 – 2,5
Lunak (<i>soft</i>)	12,5 - 25	2,5 - 5
Menengah (<i>medium</i>)	25 – 50	5 – 10
Kaku (<i>stiff</i>)	50 – 100	10 – 20
Sangat kaku (<i>very stiff</i>)	100 – 200	20 – 40
Keras (<i>hard</i>)	> 200	> 40

(Sumber: Mochtar, 2012)

d. Modulus Elastisitas Tanah

Nilai *modulus young* menunjukkan besarnya nilai elastisitas tanah yang merupakan perbandingan antara tegangan yang terjadi terhadap regangan. Nilai ini bisa didapatkan dari *triaxial test*. *Triaxial test unconsolidated undrained* menghasilkan nilai modulus *undrained* (E_u) yang didapat dari grafik *stress-strain*. E_u digunakan untuk pemodelan *Mohr Coulomb Undrained C*. Selain itu, menurut Bowless (1988) menyajikan estimasi mengenai korelasi antara nilai modulus elastisitas tanah (E_u) pada tanah lempung dan kuat geser tanah *undrained* (c_u) yang ditunjukkan dengan persamaan berikut:

$$E_u = 400 \times C_u \quad (3.1)$$

Keterangan:

E_u = Modulus elastisitas tanah *undrained* (MPa)

C_u = Kuat geser tanah *undrained* (kPa)

Sedangkan pada pemodelan *Mohr Coulomb Undrained B*, parameter modulus (E') diperoleh berdasarkan persamaan empiris sebagai berikut:

$$E' = \frac{2 \times (1 + \nu') \times E_u}{2 \times (1 + \nu_u)} \quad (3.2)$$

Keterangan:

E' = Modulus elastisitas tanah efektif (kPa)

ν' = *Poisson ratio* efektif

E_u = Modulus elastisitas tanah *undrained* (kPa)

ν_u = *Poisson ratio undrained* (0,495)

Berbeda halnya dengan pemodelan *Mohr Coulomb*, model *Hardening Soil* menggunakan 3 (tiga) *input* parameter modulus yang berbeda yaitu *loading* modulus (E_{50}^{ref}), *unloading reloading* modulus (E_{ur}^{ref}), dan oedometer modulus (E_{oed}^{ref}). Pada beberapa jenis tanah diasumsikan nilai $E_{ur}^{ref} \approx 3 E_{50}^{ref}$ dan $E_{oed}^{ref} \approx E_{50}^{ref}$.

e. *Power* (m)

Selain dari ketiga modulus yang diperlukan pada pemodelan *Hardening Soil*, parameter kekakuan lainnya yaitu *power* (m). *Power* adalah hubungan

tegangan terhadap kekakuan. Nilai m pada tanah lempung biasanya bernilai 1, lanau 0,7 – 0,8, dan untuk pasir yaitu 0,5.

f. *Poisson Ratio* (ν)

Nilai *poisson ratio* ditentukan sebagai rasio kompresi poros terhadap regangan pemuaian lateral. *Poisson ratio* sebagai parameter elastisitas diperoleh dengan membandingkan deformasi aksial dan regangan transversal pada suatu bahan yang sedang diberikan gaya.

Tabel 3.6 Korelasi *Poisson Ratio* dengan N-SPT

Konsistensi	N-SPT	<i>Poisson Ratio</i>
<i>Very soft</i>	2	0,5
Soft	2 - 4	0,5
Medium	4 – 8	0,5
Stiff	8 – 15	0,45
Very stiff	15 -30	0,4
Hard	30	0,35
	40	0,35
	60	0,3
	80	0,3
	100	0,25
	120	0,25

(Sumber: Wesley, L.D., 1997)

g. Sudut Geser Dalam

Sudut geser dalam adalah sudut yang terbentuk dari interaksi antara tegangan normal dengan tegangan geser di dalam material tanah atau batuan.

Tabel 3.7 Korelasi Sudut Geser dengan Jenis Tanah

Jenis Tanah	Sudut Geser Dalam ($^{\circ}$)
Kerikil kepasiran	35 – 40
Kerikil kerakal	35 – 40
Pasir padat	35 – 40
Pasir lepas	30
Lempung kelanauan	25 – 30
Lempung	20 – 25

(Sumber: Braja M Das., 1996)

h. Sudut Dilatansi

Sudut dilatansi diukur melalui perbandingan perubahan ketebalan sampel tanah terhadap pergeseran tegangan lateral maksimum. Penentuan sudut dilatansi ini

bergantung pada karakteristik kekuatan geser dan perilaku tegangan-regangan tanah. Pada tanah lempung, sudut dilatasi cenderung menuju nol atau menunjukkan sedikit dilatasi. Sementara pada tanah pasir, sudut dilatasi bergantung pada sudut gesernya. Meskipun demikian, dalam sebagian besar situasi, sudut dilatasi cenderung menuju nol.

3.6 Dewatering

Dewatering merupakan suatu proses yang bertujuan untuk penurunan sementara tekanan pori atau muka air tanah yang tinggi. Proses *dewatering* ini dilaksanakan dengan maksud mencegah rembesan memasuki area galian, karena dampak dari rembesan tersebut dapat menghambat kemajuan pekerjaan. Selain itu, *dewatering* juga bertujuan untuk meningkatkan kestabilan lereng, guna mencegah potensi terjadinya kelongsoran. Keberhasilan proses ini juga terlihat dalam upaya menjaga bagian dasar galian agar terhindar dari *heaving* yang disebabkan oleh *uplift*. Selanjutnya, *dewatering* turut berperan dalam meningkatkan kepadatan tanah pada bagian dasar galian *basement*, serta mengeringkan wilayah galian secara keseluruhan. Tujuan akhir proses *dewatering* ini adalah membuat area galian menjadi lebih kondusif, sehingga proses pengangkatan material dan pelaksanaan pekerjaan di dalam lubang galian dapat dilakukan dengan lebih efisien (Lisman et al., 2020).

Berdasarkan masa pelaksanaannya, *dewatering* dibagi menjadi dua, yakni :

a. *Dewatering* Sementara

Proses pemindahan air di area penggalian hanya dilaksanakan selama proses konstruksi struktur. Setelah itu, struktur tersebut dibiarkan berada dalam keadaan terendam oleh air. Struktur yang telah dibentuk akan dilapisi dengan lapisan tahan air dan penghenti air yang bertujuan untuk menghindari penetrasi kelembapan ke dalam komponen struktural.

b. *Dewatering* Tetap

Proses pengurangan air yang terus menerus dilakukan meskipun struktur telah selesai dibangun. Jenis ini umumnya digunakan dengan tujuan meningkatkan stabilitas tanah disekitarnya dan menjauhkan air yang memiliki sifat korosif dari struktur tersebut.

3.7 *Inclinometer*

Inclinometer merupakan sebuah alat yang dimanfaatkan untuk mendeteksi deformasi atau pergerakan horizontal pada struktur dinding penahan tanah. Pemanfaatan *inclinometer* menjadi penting dalam menilai faktor keamanan dalam pelaksanaan pekerjaan galian. Sensor yang terdapat pada perangkat ini dirancang untuk mengukur kemiringan lereng selama berbagai kegiatan seperti *tunneling*, ekskavasi, dan *dewatering*. Aktivitas-aktivitas semacam ini mempengaruhi tanah yang mendukung struktur. Pada dasarnya, proses pemasangan *inclinometer* menyesuaikan dengan konteks aplikasi yang bersangkutan. Perangkat dapat dipasang secara vertikal untuk memonitor kemiringan yang terjadi atau gerakan apapun pada dinding dan tanggul penopang. Adapun untuk memantau penyelesaian tanah di sekitar titik *tunneling*, *inclinometer* akan di *install* secara horizontal.

Sistem manual pada alat terdiri dari komponen-komponen berikut:

- a. Probe *inclinometer*
- b. Gulungan kabel (ditandai setiap 0,5 m / 1 m)
- c. Unit pembacaan seluler
- d. Aksesori: baterai kabel *reel*, pengisi daya baterai, baterai seluler, pengisi daya seluler.

3.8 Program Plaxis

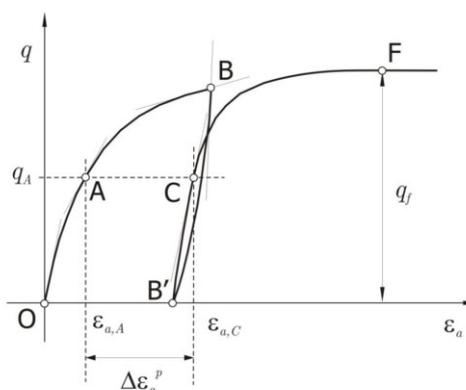
Program analisis geoteknik yang digunakan adalah Plaxis 8.2, dipilih karena kemampuannya untuk menganalisis stabilitas tanah melalui metode elemen hingga yang memungkinkan analisis mendekati perilaku sebenarnya. Plaxis 8.2 menyajikan beragam analisis tentang *displacement*, tegangan pada tanah, faktor keamanan lereng, dan aspek lainnya. *Finite Element Method* (FEM) atau biasanya disebut *Finite Element Analysis* (FEA), merupakan prosedur numerik yang diterapkan untuk menyelesaikan masalah-masalah rekayasa. Kompleksitas perhitungan dalam geoteknik mendorong pembuatan program seperti Plaxis 8.2 yang berfungsi sebagai alat bantu untuk perhitungan terkait konstruksi tanah, bertujuan mencegah kegagalan konstruksi dan meningkatkan faktor keselamatan kerja.

Metode elemen hingga adalah suatu prosedur perhitungan yang digunakan dalam penyelesaian permasalahan matematis yang sering dijumpai dalam rekayasa teknik. Prinsip dasar dari metode ini melibatkan pembagian bentuk atau struktur yang kompleks menjadi elemen-elemen yang lebih kecil. Elemen-elemen tersebut kemudian dihubungkan melalui node atau titik. Tiap titik memiliki satu atau lebih derajat kebebasan untuk menentukan jumlah fungsi yang diterapkan. Dengan memecahkan nilai-nilai pada tiap titik, tegangan dan regangan pada setiap elemen dapat diperhitungkan. Plaxis 2D memiliki beberapa jenis pemodelan tanah yang dapat digunakan untuk memodelkan tanah, diantaranya:

a. *Mohr Coulomb*

Model *Mohr Coulomb* (MC model) mempertimbangkan bahwa plastisitas terkait dengan regangan yang bersifat *irreversible* atau tidak dapat dikembalikan ke kondisi awal. Untuk menilai apakah plastisitas telah terjadi dalam perhitungan digunakan suatu fungsi kekelehan yang bergantung pada tegangan dan regangan. Umumnya, fungsi kekelehan dapat diungkapkan sebagai suatu bidang dalam ruang tegangan utama. Sebuah model plastis sempurna merupakan suatu model konstitutif dengan bidang leleh tertentu, yaitu bidang leleh yang sepenuhnya didefinisikan oleh parameter model dan tidak terpengaruh oleh peregangannya (plastis) (Kurguzov & Fomenko, 2019).

Prinsip dasar dari teori elastoplastik adalah regangan dapat dikategorikan dalam dua bagian, yaitu regangan elastik ε^e dan regangan plastis ε^p . (Ir. Gouw Tjie Liong M.Eng. ChFC, 2012)



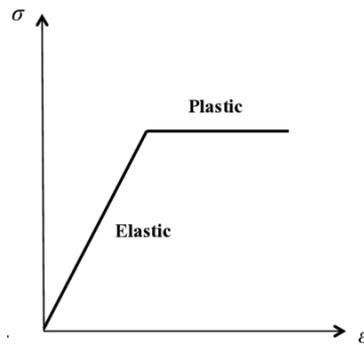
Gambar 3.8 Grafik Teori Elastoplastik

(Sumber: Gouw, Tjie Liong, 2012)

$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$, ditulis dalam peningkatan regangan menjadi:

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}^e + \underline{\varepsilon}^p \quad (3.3)$$

Dalam model *Mohr Coulomb* hubungan tegangan dan regangan yang tidak linear tersebut dijadikan dua buah garis linear, yaitu bagian linear elastik dan bagian linear plastis sempurna seperti gambar dibawah:



Gambar 3.9 Grafik Modulus *Mohr Coulomb*

(Sumber : Gouw, Tjie Liong, 2012)

Adapun fungsi leleh *Mohr Coulomb* yaitu:

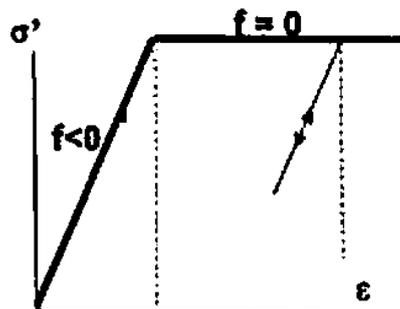
$$f = \frac{1}{2} (\sigma'_1 - \sigma'_3) - \frac{1}{2} ((\sigma'_1 - \sigma'_3) \sin \phi' - \bar{c} \cos \phi') \quad (3.4)$$

Bila: $S = \frac{1}{2} (\sigma'_1 - \sigma'_3)$ dan $R = \frac{1}{2} (\sigma'_1 - \sigma'_3)$, maka:

Persamaan diatas untuk gaya tekan dianggap positif: $s = \frac{1}{2} (\sigma'_1 - \sigma'_3)$,

Bila tarik dianggap positif: $s = -\frac{1}{2} (\sigma'_1 - \sigma'_3)$, maka f dapat ditulis:

$$f = R + S \sin \phi' - c \cos \phi' \leq 0 \quad (3.5)$$



Gambar 3.10 Grafik Fungsi *Mohr Coulomb*

(Sumber : Gouw, Tjie Liong, 2012)

Saat $f < 0$ → Tanah berperilaku elastik

Saat $f = 0$ dan $df = 0$ → Tanah berperilaku plastik

Saat $f = 0$ dan $df < 0$ → *Unloading* dari kondisi plastis = berperilaku elastis

$f > 0$ → Tidak mungkin terjadi

b. *Hardening Soil*

Hardening Soil model (HS model) merupakan model yang canggih yang dapat diterapkan untuk menggambarkan berbagai perilaku tanah dan batuan. Perbedaan utama antara *Hardening Soil* model dan *Mohr Coulomb* model (MC-model) adalah bahwa MC-model membatasi nilai tegangan berdasarkan sudut geser, sementara HS-model menjelaskan jenis elastoplastis dari model hiperbolik. Jenis hubungan hiperbolik antara tegangan dan regangan ini dikembangkan untuk digunakan dalam analisis kenaikan deformasi tanah yang bersifat non-linear (Lim et al., 2010).

Dalam Plaxis, perumusan model Duncan dan Chang disebut sebagai *Hardening Soil* model. Model formula Duncan dan Chang didasarkan atas persamaan hiperbolik yang dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\sigma_1 - \sigma_3 &= \frac{\varepsilon}{a+b\varepsilon} \\ q &= \frac{\varepsilon}{1/E_i + 1/q_a \varepsilon} \\ \frac{q}{E_i} + \frac{q}{q_a} \varepsilon &= \varepsilon \\ \left(1 - \frac{q}{q_a}\right) \varepsilon &= q/E_i \\ \varepsilon &= \frac{1}{E_i} \frac{q}{1 - \frac{q}{q_a}}\end{aligned}\tag{3.6}$$

Keterangan:

σ_1 = Major principal stress (kN/m²)

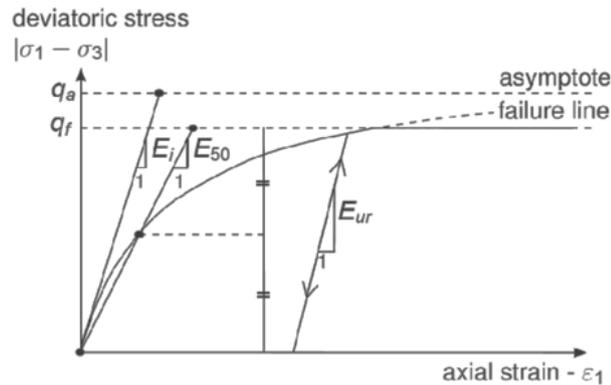
σ_3 = Minor principal stress (kN/m²)

ε = Regangan axial

a dan b = Konstanta material

q_a = Kuat geser batas (kN/m²)

E_i = Kekakuan awal (kN/m²)



Gambar 3.11 Grafik Modulus *Hardening Soil*
(Sumber : Gouw, Tjie Liong, 2012)

c. *Soft Soil*

Soft Soil model (SS model) dapat digunakan ketika memodelkan perilaku tanah lunak seperti lempung dan tanah gambut yang terkonsolidasi secara normal. Pada SS model, asumsi meliputi hubungan logaritmik antara regangan volumetrik ϵ_v dengan tegangan efektif p' yang membutuhkan nilai λ^* dimana λ^* adalah indeks pemampatan yang dimodifikasi dan dapat ditentukan berdasarkan pemampatan tanah yang terjadi pada saat pembebanan primer. Hal lain ditemukan juga notasi k^* dimana k^* adalah indeks pemuaihan yang dimodifikasi, menjelaskan kemampumampatan dari tanah pada pengurangan beban yang diikuti pembebanan kembali sebagai asumsi respon tanah selama pengurangan beban dan pembebanan kembali bersifat elastis (Apriyani et al., 2016).

3.9 Tahapan Analisis

Dalam menganalisis deformasi dinding penahan tanah, langkah-langkah analisis melibatkan:

a. Tahap 1

Perhitungan daya dukung lateral kelompok tiang.

$$H_g = \sum_{j=1}^n H_u \tag{3.7}$$

Keterangan:

H_g = Beban lateral kelompok tiang (kN)

H_u = Beban lateral tiang tunggal (kN)

n = Jumlah tiang

b. Tahap 2

Perhitungan daya dukung lateral tiang tunggal. Untuk tiang panjang dihitung dengan persamaan:

$$Hu = \frac{2 M_y}{\frac{3d}{2} + \frac{f}{2}} \quad (3.8)$$

$$M_y = (9/4) c_u d g^2 - 9c_u d f(3d/2 + f/2) \quad (3.9)$$

$$g = L - 3d/2 - f \quad (3.10)$$

$$f = Hu/9 (c_u d) \quad (3.11)$$

Untuk tiang pendek dihitung dengan persamaan:

$$Hu = 9c_u d (L - 3d/2) \quad (3.12)$$

Keterangan:

Hu = daya dukung lateral (kN)

My = Tahanan momen tiang (kN.m)

L = Kedalaman pondasi (m)

d = Diameter pondasi (m)

f = Letak momen maksimum (m)

C_u = *Undrained cohesion* (t/m²)

c. Tahap 3

Perhitungan modulus elastisitas dan momen inersia tiang.

$$E_p = 4700 x \sqrt{f_c} x b x h \quad (3.13)$$

$$I_p = \frac{E \times h^3 \times b}{12} \quad (3.14)$$

Keterangan:

E_p = Modulus elastisitas tiang (kN/m²)

f_c = Mutu beton (MPa)

b = Lebar tiang (m)

h = Tebal tiang (m)

I_p = Momen inersia tiang (m⁴)

d. Tahap 4

Perhitungan deformasi kelompok tiang.

$$y_o = \frac{H (e+zf)^3}{12 E_p I_p} \quad (3.15)$$

Keterangan:

- y_o = Deformasi (m)
- e = Jarak titik beban ke muka tanah / 1,5D (m)
- zf = Jarak titik jepit dari muka tanah (m)
- H = Beban lateral (kN)

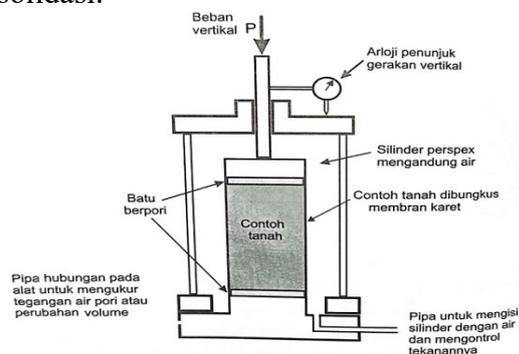
3.10 Faktor Keamanan

Faktor keamanan (SF) dinyatakan sebagai perbandingan antara gaya tahanan dan gaya yang mendorong. Meskipun definisi ini sesuai untuk pondasi, namun tidak sepenuhnya relevan untuk turap, dinding penahan tanah, atau timbunan. Pada struktur-struktur semacam itu lebih tepat menggunakan definisi faktor keamanan dalam konteks mekanika tanah, yakni perbandingan antara kuat geser yang tersedia dengan kuat geser yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan. Dalam proses perencanaan, perlu mempertimbangkan faktor keamanan pada kegiatan galian (Alfana et al., 2024).

$$SF = \frac{\sum \text{Momen Pasif}}{\sum \text{Momen Aktif}} \quad (3.16)$$

3.11 Pengujian Triaksial

Pada pengujian ini, dapat digunakan tanah benda uji dengan diameter kira-kira 3,81 cm dan tinggi 7,62 cm. Dengan alat triaksial, semua jenis uji kekuatan geser dapat dilakukan. Selain itu, alat ini bisa digunakan untuk mengukur sifat permeabilitas atau konsolidasi.



Gambar 3.12 Uji Triaksial

(Sumber : Laurence D. Wasley, 2010)

Pada pengujian ini, sampel tanah berbentuk silinder diposisikan dalam sel triaksial yang memiliki batu berpori pada kedua ujungnya, kemudian dilapisi dengan membran karet. Bagian atas sel dipasang dan diisi dengan air untuk menerapkan tekanan air yang dikenal sebagai tekanan sel. Uji triaksial umumnya terdiri dari tiga jenis, yaitu uji tak terdrainasi, uji konsolidasi tak terdrainasi, dan uji terdrainasi. Terdapat dua tahap yaitu konsolidasi (tahap 1) dan tahap pembebanan (tahap 2).

a. Uji Tak Terkonsolidasi Tak Terdrainase (*Unconsolidated-Undrained*)

Tidak diizinkan pada kedua tahap ini adanya drainase. Ketika pada pengujiannya air tidak diizinkan mengalir keluar, beban normal tidak dipindahkan ke butiran tanah. Kondisi tanpa drainasi ini mengakibatkan timbulnya tekanan pori berlebih (*excess pore pressure*) tanpa adanya hambatan geser yang dihasilkan oleh perlawanan butiran tanah. Pengujian ini tidak dapat diterapkan jika laju konstruksi lambat sehingga memungkinkan terjadinya konsolidasi tanah. Pengujian ini mewakili tanah di lokasi konstruksi di mana laju konstruksi sangat cepat dan air pori tidak memiliki cukup waktu untuk menghilang.

b. Uji Konsolidasi Tak Terdrainasi (*Consolidated-Undrained*)

Drainasi diperbolehkan selama periode konsolidasi, hingga contoh tanah mencapai kondisi konsolidasi penuh, yakni ketika semua tekanan air pori tereduksi menjadi nol. Pada tahap pembebanan, drainasi tidak diizinkan dan umumnya dilakukan pengukuran tekanan air pori (Zain et al., 2011).

c. Uji Terdrainasi (*Consolidated-Drained*)

Pada kedua tahap, drainasi diizinkan. Sehingga tekanan air pori menjadi nol. Pada kondisi ini seluruh tegangan selama proses pengujian ditahan oleh gesekan antar butirannya.

3.12 Analisa *Undrained*

a. *Undrained A*

Perhitungan dengan memanfaatkan metode *undrained A* dilaksanakan melalui analisis tegangan efektif. Dalam pendekatan ini, aspek-aspek seperti parameter

kuat geser efektif dan kekakuan efektif menjadi pertimbangan utama. Hasil analisis ini memberikan pemahaman tentang tegangan pori yang terjadi, walaupun akurasi perhitungannya tergantung pada jenis model dan parameter tanah yang digunakan. Penting untuk dicatat bahwa nilai kuat geser *undrained* (S_u) tidak dimasukkan secara langsung, melainkan diturunkan dari model konstitutif yang dipilih. Keandalan nilai S_u ini dapat ditingkatkan melalui pemeriksaan dan validasi dengan data empiris yang relevan,

Berikut adalah detail parameter yang digunakan dalam *undrained A* :

- 1) Jenis analisa : *Effective Stresses Analysis*
- 2) Tipe material : *Undrained A*
- 3) Kuat geser tanah efektif : c', ϕ', ψ'
- 4) Kekakuan tanah efektif : E_{50}', ν'

b. *Undrained B*

Analisis *undrained B* digunakan dalam perhitungan tegangan efektif, melibatkan parameter kekakuan efektif dan kuat geser *undrained*. Dalam konteks analisis ini, memungkinkan untuk mendapatkan nilai tegangan air yang muncul. Namun, hasil yang diberikan memiliki kecenderungan ketidakakuratan sehingga umumnya dianggap tidak tepat untuk diterapkan. Sementara itu, nilai kuat geser *undrained* ($C_u = S_u$) dianggap sebagai parameter masukan dalam analisis. Oleh karena itu, analisis ini cenderung menunjukkan ketidakakuratan dalam perhitungan stabilitas *undrained*. Berikut adalah detail parameter yang digunakan dalam *undrained B*:

- 1) Jenis analisa : *Effective Stresses Analysis*
- 2) Tipe material : *Undrained B*
- 3) Kuat geser tanah efektif : $c = c_u, \phi = 0, \psi = 0$
- 4) Kekakuan tanah efektif : E_{50}', ν'

c. *Undrained C*

Analisis *undrained C* digunakan dalam perhitungan tegangan total, di mana melibatkan parameter kekakuan *undrained* dan kuat geser *undrained*. Dalam konteks analisis ini, tidak memungkinkan untuk memperoleh nilai tegangan air pori, sehingga hasil analisis tegangan efektif harus diinterpretasikan sebagai

tegangan total. Namun, nilai kuat geser *undrained* ($C_u = s_u$) tetap dianggap sebagai parameter dalam analisis ini. Sehingga, diharapkan bahwa analisis ini tidak akan menghasilkan kesalahan perhitungan dalam mengevaluasi stabilitas *undrained*. Parameter yang digunakan dalam *undrained C*:

- 1) Jenis analisa : *Total Stresses Analysis*
- 2) Tipe material : *Drained / non-porous (Undrained C)*
- 3) Kuat geser tanah efektif : $c = c_u, \phi = 0, \psi = 0$
- 4) Kekakuan tanah efektif : $E_u, \nu = 0,495$