

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Pengertian Tanah

Dalam pandangan teknik sipil, tanah adalah himpunan mineral, bahan organik, dan endapan – endapan yang relatif lepas (*loose*), yang terletak di atas batuan dasar (*bedrock*) (Hardiyatmo, 2010). Tanah merupakan material yang terdiri dari agregat (butiran) padat yang tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan – bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang – ruang kosong diantara partikel – partikel padat tersebut (Das, 1988).

Istilah pasir, lempung, lanau atau lumpur digunakan untuk menggambarkan ukuran partikel pada batas ukuran butiran yang telah ditentukan. Akan tetapi, istilah yang sama juga digunakan untuk menggambarkan sifat tanah yang khusus. Sebagai contoh, lempung adalah jenis tanah yang bersifat kohesif dan plastis, sedang pasir digambarkan sebagai tanah yang tidak kohesif dan plastis, sedangkan pasir digambarkan sebagai tanah yang tidak kohesif dan tidak plastis (Hardiyatmo, 2010).

3.2 Tanah Lunak

Tanah lunak menurut Panduan Geoteknik 1 – DPU (2002) merupakan tanah yang dapat menyebabkan masalah ketidakstabilan dan penurunan jangka panjang yang tidak dapat ditolerir, tanah tersebut mempunyai kuat geser yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi. Jenis tanah lunak dibedakan menjadi tanah lunak anorganik (lempung dimana kadar organiknya kurang dari 25 %) dan tanah lunak organik (gambut).

Tanah lempung lunak merupakan jenis tanah yang mengandung mineral-mineral lempung dan air yang tinggi sehingga menyebabkan kuat gesernya rendah. Ada dua istilah dalam geoteknik yaitu lempung lunak bilamana jenis tanah ini mempunyai kuat geser antara 12,5–25 kN/m², tanah ini mudah dibentuk dengan jari tangan, sedangkan tanah lempung sangat lunak mempunyai kuat geser

$< 12,5 \text{ kN/m}^2$ bila diremas dengan kepalan tangan akan keluar di sela-sela jari tangan.

Berbeda dengan tanah gambut yang pembentuk utamanya dari sisa bahan organik, ada dua bentuk untuk menyatakan tanah gambut yaitu tanah organik dengan kandungan kadar bahan organik berkisar antara 25–75 %. Selain sifat tersebut di atas, tanah gambut mempunyai sifat kompresibilitas, dan permeabilitas yang tinggi.

Para ahli memiliki definisi yang berbeda tentang tanah lempung, antara lain Hardiyatmo (2010) menjelaskan bahwa tanah lempung tersusun atas mineral-mineral hasil pelapukan tanah secara kimiawi yang berukuran diameter butiran lebih kecil dari 0,002 mm, sedangkan Holtz dan Kovacs (1981) menyatakan bahwa lempung adalah tanah yang mengandung mineral-mineral lempung dan memiliki plastisitas serta kohesifitas. Dalam standart AASHTO (*American Association Of State Highway and Transporting Official*) dan ASTM (*American Standard Testing Material*), penentuan klasifikasi tanah lempung ditentukan dari ukuran butir, indek plastisitas dan batas cair. Standart AASHTO mensyaratkan lebih dari 35% lolos saringan nomor 200 dengan indeks plastisitas minimum 11%, sedangkan standar ASTM mensyaratkan lebih dari 50 % lolos saringan nomor 200. Holtz dan Kovacs (1981) memberikan garis besar identifikasi tanah lempung yaitu berbutir halus dan tidak dapat dilihat butiran tunggalnya, bersifat kohesi dan plastis.

Dari pendapat beberapa orang peneliti, pada dasarnya yang disebut tanah lunak adalah tanah yang mempunyai karakteristik buruk untuk dijadikan material pondasi. Tanah lunak mempunyai daya dukung yang rendah dan penurunan yang tinggi. Sehingga jika dijadikan sebagai pondasi bangunan atau jalan, maka harus dilakukan stabilisasi atau perbaikan tanah lunak terlebih dahulu sehingga layak dan memenuhi persyaratan sebagai lapis pondasi atau lapisan tanah dasar untuk pembuatan jalan raya.

3.2.1 Tanah Dasar

Tanah dasar adalah permukaan tanah semula atau permukaan tanah galian atau tanah permukaan timbunan yang dipadatkan dan merupakan permukaan dasar untuk perletakan bagian-bagian perkerasan yang lainnya. Menurut Sukirman (1995), tanah dasar adalah lapisan tanah setebal 50 – 100 cm di atas mana akan diletakkan lapis pondasi bawah konstruksi jalan raya. Tanah dasar yang baik untuk konstruksi perkerasan adalah tanah dasar yang berasal dari lokasi setempat atau dengan tambahan timbunan dari lokasi lain yang telah dipadatkan dengan tingkat kepadatan tertentu, sehingga mempunyai daya dukung yang mampu mempertahankan perubahan volume selama masa pelayanan walaupun terdapat perbedaan kondisi lingkungan dan jenis tanah setempat.

Umumnya permasalahan yang terjadi menyangkut tanah dasar berupa perubahan bentuk tetap, sifat mengembang dan daya dukung tidak merata. Bahan *subgrade* akan berpengaruh terhadap daya dukung tanah dasar tersebut. Semakin bagus spek tanah untuk *subgrade* maka akan semakin besar daya dukung tanah tersebut. Terutama untuk tanah dasar berupa tanah timbunan.

3.2.2 Timbunan Di Atas Tanah Lunak

Pekerjaan timbunan mencakup pengadaan, pengangkutan, penghamparan dan pemadatan tanah atau bahan berbutir yang disetujui untuk pembuatan timbunan. Daerah tanah lunak atau tanah yang tidak dapat dipadatkan atau tanah rawa, dasar pondasi timbunan harus dipadatkan seluruhnya (termasuk penggemburan dan pengeringan atau pembasahan bila diperlukan) sampai 15 cm bagian permukaan atas dasar pondasi memenuhi kepadatan yang disyaratkan untuk timbunan yang ditempatkan di atasnya. Penimbunan tanah di atas tanah lunak ini dipengaruhi oleh ketebalan lapisan tanah dibawah permukaan tanah dan ketinggian yang diharapkan setelah tanah mengalami konsolidasi. Proses penimbunan berfungsi untuk meningkatkan tegangan air pori tanah yang terdapat di bawah timbunan secara perlahan diikuti oleh kenaikan tegangan efektif pada tanah dasar. Bantuan dari drainase vertikal berfungsi untuk mempercepat disipasi air pori dengan membuat material yang bersifat permeable sehingga air pori dapat

terdispersi secara horizontal dan mengalir melalui drainase vertikal tersebut.

3.2.3 Perkuatan Pada Konstruksi Timbunan Di Atas Tanah Lunak

Timbunan yang dibangun di atas tanah lunak memiliki kecenderungan untuk menyebar secara lateral akibat tekanan tanah horizontal yang bekerja di dalam timbunan. Tekanan tanah ini menimbulkan tegangan geser horizontal pada dasar timbunan yang harus ditahan oleh tanah pondasi. Apabila tanah pondasi tidak memiliki tahanan geser yang cukup, maka akan terjadi keruntuhan.

Pemasangan geotekstil atau geogrid berkekuatan tinggi yang direncanakan dengan tepat akan berfungsi sebagai perkuatan untuk meningkatkan stabilitas serta mencegah keruntuhan. Geotekstil atau geogrid juga akan mengurangi pergeseran horizontal dan vertikal tanah di bawahnya, sehingga dapat mengurangi penurunan diferensial.

3.2.4 Fungsi dan Aplikasi Perkuatan Pada Konstruksi Timbunan

Fungsi perkuatan pada konstruksi timbunan adalah sebagai berikut:

1. meningkatkan faktor keamanan rencana,
2. menambah tinggi timbunan,
3. mencegah pergeseran timbunan selama pelaksanaan, dan
4. memperbaiki kinerja timbunan karena penurunan pasca konstruksi yang seragam.

Perkuatan timbunan yang dibangun di atas tanah lunak umumnya akan berada dalam dua kondisi, yaitu:

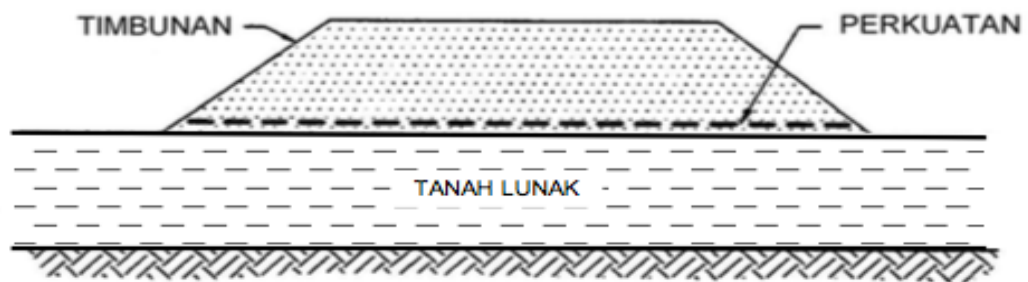
1. timbunan dibangun di atas deposit yang seragam,
2. timbunan dibangun di atas zona lemah lokal.

Aplikasi perkuatan timbunan yang paling umum untuk kondisi pertama adalah timbunan jalan, tanggul, atau bendungan yang dibangun di atas lapisan lanau, lempung atau gambut jenuh air yang sangat lunak (lihat Gambar 3.1a). Pada kondisi ini, arah terkuat dari geosintetik biasanya ditempatkan tegak lurus terhadap garis tengah timbunan. Perkuatan tambahan dengan arah terkuat yang ditempatkan sejajar dengan garis tengah timbunan dapat juga dibutuhkan pada

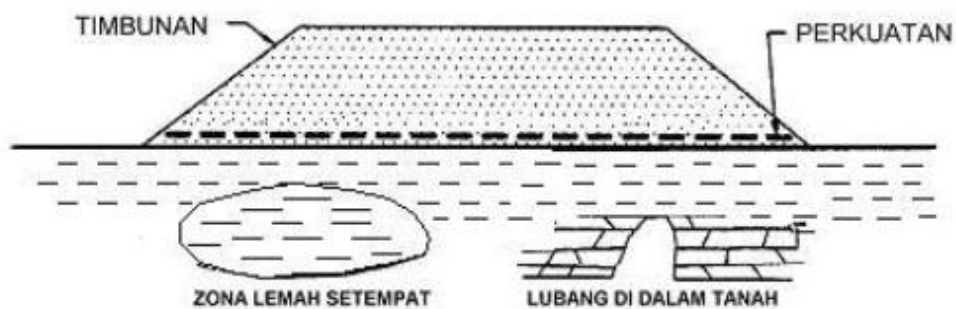
ujung timbunan.

Aplikasi kedua adalah konstruksi timbunan yang berada di atas tanah yang mempunyai zona lemah lokal atau tanah berongga. Zona atau rongga ini dapat diakibatkan oleh lubang amblasan (*sink hole*), aliran sungai tua, atau kantung lanau, lempung atau gambut (lihat Gambar 3.1b). Untuk aplikasi ini, fungsi perkuatan adalah sebagai jembatan di atas zona lemah lokal atau rongga, dan perkuatan tarik yang dibutuhkan dapat lebih dari satu arah. Oleh karena itu, arah terkuat dari geosintetik harus ditempatkan dengan arah yang benar terhadap garis tengah timbunan.

Perkuatan geotekstil atau geogrid dapat dipasang satu lapis atau lebih tergantung besarnya gaya geser yang akan ditahan.



(a) Timbunan di Atas Tanah Lunak



(b) Timbunan di Atas Zona Lemah Setempat dan Tanah Berongga

Gambar 3.1 Aplikasi Timbunan yang Diperkuat
(sumber: Hotlz dkk, 1998)

3.2.5 Pengaruh Beban Di Atas Tanah Timbunan

Beban terbagi rata (q) di atas tanah urug dapat di anggap sebagai beban tanah setebal h_s dengan berat volume (γ) tertentu. Dengan demikian tinggi $h_s = q/\gamma$. Tekanan tanah aktif pada kedalaman h_s dari tinggi tinggi tanah anggapan tersebut adalah (Hardiyatmo, 2011), seperti pada Persamaan 3.1.

$$P_a = h_s \gamma K_a = q K_a \quad (3.1)$$

Jadi, akibat beban terbagi rata, terdapat tambahan gaya tekanan tanah aktif (P_a') sebesar, seperti pada Persamaan 3.2.

$$P_a' = q K_a H \quad (3.2)$$

keterangan:

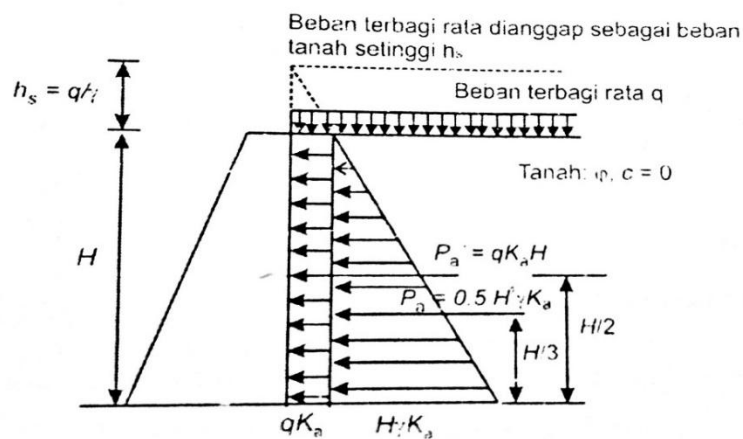
q = beban terbagi rata (kN/m^2),

H = tinggi dinding penahan tanah (m),

K_a = koefisien tanah aktif, dan

γ = berat volume tanah (kN/m^3).

Diagram tekanan tanah aktif, bila dinding penahan tanah di pengaruhi oleh beban terbagi rata di atas tanah urug di tunjukan dalam Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Tekanan Tanah Aktif Akibat Beban Terbagi Rata Q untuk Teori Rankie.

(Sumber: Hardiyatmo, 2014)

3.3 Geosintetik

Pada dasarnya, geosintetik (Pedoman Perencanaan dan Pelaksanaan Perkuatan Tanah dengan Geosintetik, DPU 2009) terbagi menjadi dua yaitu tekstil dan jaring (*web*). Berdasarkan bahannya, kedua jenis geosintetik dibagi menurut

bahan sintetik dan alami. Sebagian besar geosintetik terbuat dari polimer sintetik seperti polipropilena (PP), poliester (PET) atau polietilena (PE). Material polimer tersebut sangat tahan terhadap degradasi biologis dan kimiawi.

Berdasarkan sifat permeabilitas, geosintetik terbagi menjadi kedap air dan lolos air. Geotekstil adalah jenis geosintetik yang lolos air yang berasal dari bahan tekstil. Geomembran merupakan jenis geosintetik kedap air yang biasa digunakan sebagai penghalang zat cair.

Pada umumnya geosintetik dapat diidentifikasi berdasarkan:

1. tipe polimer (definisi deskriptif, misalnya polimer berkepadatan tinggi, polimer berkepadatan rendah),
2. tipe elemen (misalnya filamen, tenunan, untaian, rangka, rangka yang dilapis),
3. proses pembuatan (misalnya teranyam, tak teranyam dan dilubangi dengan jarum, tak teranyam dan diikat dengan panas, diperlebar atau ditarik, dijahit, diperkeras, diperhalus),
4. tipe geosintetik primer (misalnya geotekstil, geogrid, geomembran),
5. massa per satuan luas (untuk geotekstil, geogrid, *geosynthetic clay liner*, dan geosintetik penahan erosi) dan atau ketebalan (untuk geomembran).

3.3.1 Fungsi dan Aplikasi Geosintetik

Geosintetik memiliki fungsi primer dan fungsi sekunder yang biasanya lebih dari satu fungsi. Kedua fungsi tersebut menjadikan geosintetik dapat berkontribusi secara total pada saat penerapannya, sehingga perlu dipertimbangkan pada saat perhitungan dan pembuatan spesifikasi perencanaan.

Geosintetik memiliki enam fungsi sebagai berikut ini.

1. Filtrasi: bahan geosintetik digunakan untuk mengalirkan air ke dalam sistem drainase dan mencegah terjadinya migrasi partikel tanah melalui filter. Contoh penggunaan geosintetik sebagai filter adalah pada sistem drainase porous.
2. Drainase: bahan geosintetik digunakan untuk mengalirkan air dari dalam tanah. Bahan ini contohnya digunakan sebagai drainase di belakang abutmen atau dinding penahan tanah.
3. Separator: bahan geosintetik digunakan di antara dua material tanah yang tidak

sejenis untuk mencegah terjadi pencampuran material. Sebagai contoh, bahan ini digunakan untuk mencegah bercampurnya lapis pondasi jalan dengan tanah dasar yang lunak sehingga integritas dan tebal rencana struktur jalan dapat dipertahankan.

4. Perkuatan: sifat tarik bahan geosintetik dimanfaatkan untuk menahan tegangan atau deformasi pada struktur tanah.
5. Penghalang: bahan geosintetik digunakan untuk mencegah perpindahan zat cair atau gas. Fungsi geosintetik ini contohnya adalah geomembran untuk menjaga fluktuasi kadar air pada tanah ekspansif atau digunakan pada penampungan sampah.
6. Proteksi: bahan geosintetik digunakan sebagai lapisan yang memperkecil tegangan lokal untuk mencegah atau mengurangi kerusakan pada permukaan atau lapisan tersebut. Sebagai contoh, tikar geotekstil (*mat*) digunakan untuk mencegah erosi tanah akibat hujan dan aliran air. Contoh lainnya, geotekstil tak-teranyam digunakan untuk mencegah tertusuknya geomembran oleh tanah atau batu di sekelilingnya pada saat pemasangan.

3.3.2 Geosintetik Untuk Perkuatan Timbunan

Geosintetik untuk perkuatan timbunan dapat berupa geotekstil *woven*, *non woven* dan dalam bentuk geogrid. Fungsi geotekstil ini tidak sebagai tulangan, tetapi sebagai *separator* (pemisah) antara tanah lunak dengan timbunan. Bila timbunan terletak pada tanah lunak, terjadi deformasi yang berlebihan yang menyebabkan timbunan menjadi melengkung kebawah. Melengkungnya timbunan ini merusak struktur diatasnya, prinsipnya timbunan berperilaku sama seperti balok yang dibebani, dimana jika timbunan melengkung terlalu tajam akan timbul keretakan–keretakan lapis perkerasan/aspal, dan jika penurunan tidak merata maka jalan akan bergelombang.

Geotekstil yang berada dibawah timbunan jalan dapat mengurangi tegangan yang terjadi pada lapisan tanah bagian bawah ketika lapisan ini mengalami tarikan akibat beban yang bekerja. Digunakannya geotekstil pada struktur timbunan dapat lebih terjaga, sehingga beban timbunan disebarkan merata secara luas, dengan

demikian geotekstil dapat mengurangi besarnya tekanan ke tanah dibagian bawahnya.

Beban maksimum yang ditumpu perkuatan geotekstil pada umumnya dalam satu arah yaitu sepanjang lebar timbunan. Oleh sebab itu dalam arah lebar harus mempunyai kuat tarik maksimum. Dalam arah memanjang kebutuhan beban tarik hampir minimal, ini cukup menahan beban yang disebabkan perbedaan tinggi timbunan selama konstruksi.

3.3.3 Interaksi Tanah dan Geosintetik

Interaksi tanah dengan geosintetik dipengaruhi oleh nilai *interface*. Nilai *interface* diperoleh dari uji geser dan uji tarik. Beberapa nilai *interface* telah banyak diusulkan oleh beberapa peneliti dan juga turut dicantumkan dalam penawaran spesifikasi teknis produk geosintetik. Menurut Rifa'i (2009) dalam Ismanti (2012), besar *interface* dipengaruhi oleh faktor kekasaran *interface* tanah dengan perkuatan geosintetik serta faktor cara pembuatannya yaitu melalui cara mekanis, pemanasan atau dengan mencampur bahan lain. Berikut ini nilai *interface* untuk jenis tanah kohesif dengan geosintetik yang diusulkan disertai dengan keterangan asumsi dan jenis bahan yang ditinjau dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Nilai *Interface* Tanah Kohesif dengan Geosintetik

Sumber referensi	Nilai <i>interface</i>	
	Geotekstil <i>non woven</i>	Geotekstil <i>woven</i>
Suryolelono (2000)	0,67	
	Asumsi praktis di lapangan	
Brinkgreve (2002)	-	
	Asumsi praktis untuk analisis numeris Plaxis	
Kamon (2008)	-	0,85
		<i>Polypropylene woven</i>
Rifa'i (2009)	0,84 - 1,3	0,78 - 0,95
	TS600 - R206	BW250
Mariapan (2011)	-	0,85
		<i>Polypropylene woven</i>
Produsen geotekstil (2001)	0,92	0,84
	<i>Geosynthetic Clay Liners (GCL)</i>	

Sumber: Ismanti (2012)

1.4 Konsolidasi

Konsolidasi merupakan proses keluarnya air dari dalam pori-pori tanah yang menyebabkan terjadinya perubahan volume tanah (memampat). Peristiwa konsolidasi umumnya dipicu oleh adanya beban/muatan di atas tanah. Muatan tersebut dapat berupa tanah atau konstruksi bangunan yang berdiri di atas tanah. Bila lapisan tanah mengalami beban di atasnya, maka air pori akan mengalir keluar dari lapisan tersebut dan volumenya akan berkurang atau dengan kata lain akan mengalami konsolidasi (Wesley, 1997). Pada umumnya konsolidasi akan berlangsung satu arah (*one dimensional consolidation*) yaitu pada arah vertikal saja, karena lapisan yang mengalami tambahan beban itu tidak dapat bergerak dalam jurusan horisontal karena ditahan oleh tanah sekitarnya (*lateral pressure*).

Konsolidasi adalah peristiwa mampatnya tanah karena menderita tambahan tekanan efektif. Pada peristiwa konsolidasi ada dua hal yang penting yaitu:

1. besarnya penurunan yang akan terjadi ditentukan oleh:
 - a. kompresibilitas tanah,
 - b. tebal tanah kompresibel, dan
 - c. besarnya tambahan tekanan efektif.
2. laju konsolidasi, dipengaruhi oleh:
 - a. permeabilitas tanah,
 - b. tebal tanah kompresibel, dan
 - c. kondisi drainase di atas dan di bawah lapisan tanah kompresibel.

Untuk bisa mampat air yang ada di dalam pori tanah harus dikeluarkan. Kecepatan pemampatan dipengaruhi oleh proses keluar air dari dalam pori tanah dan sifat kompresibilitas tanah. Semua tanah yang mengalami tegangan akan mengalami regangan di dalam kerangka tanah tersebut. Regangan ini disebabkan oleh penggulingan, penggeseran, atau penggelinciran dan terkadang juga karena kehancuran partikel-partikel tanah pada titik-titik kontak, serta distorsi elastis. Akumulasi statistik dari deformasi dalam arah yang ditinjau ini merupakan regangan. Integrasi regangan (deformasi per satuan panjang) sepanjang kedalaman yang dipengaruhi oleh tegangan disebut penurunan. Metode penurunan seperti ini sebagian besar tidak dapat mengembalikan tanah pada keadaan semula

apabila tegangan ditiadakan karena terjadi pengurangan angka pori yang permanen. Regangan pada tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus yang kering atau jenuh sebagian akan terjadi sesudah bekerjanya tegangan. Bekerjanya tegangan terhadap tanah yang berbutir halus yang jenuh akan menghasilkan tegangan yang bergantung pada waktu.

Untuk tanah lunak, air pori ini memerlukan waktu yang cukup lama untuk mengeluarkan air keluar karena permeabilitas yang rendah (koefisien rembesan lempung sangat kecil dibanding dengan pasir). Pada umumnya, konsolidasi berlangsung dalam satu arah saja yaitu arah vertikal. Secara umum, jenis penurunan yang terjadi akibat pembebanan dapat dibagi dalam 3 tahap yaitu:

1. penurunan seketika (*immediate settlement*), yaitu ketika proses pembebanan pada tanah dilakukan. Penurunan ini terjadi akibat deformasi tanah kering atau tanah basah, dan jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air,
2. penurunan konsolidasi primer (*primary consolidation settlement*) yaitu penurunan yang ditandai dengan adanya tekanan yang besar pada tanah yang dapat menurunkan struktur tanah, dan juga penyusutan susunan dan pergerakan partikel tanah kedalam rongga tanah akibat tanah mampat dan memadat, dan
3. penurunan konsolidasi sekunder (*secondary consolidation settlement*), yaitu penurunan yang terjadi setelah semua tekanan air pori terdisipasi seluruhnya, merupakan proses pemampatan yang disebabkan penyesuaian butir-butir tanah yang bersifat plastis.

Penambahan beban vertikal di atas permukaan tanah akan menyebabkan penurunan (*settlement*). Besarnya penurunan yang terjadi pada lapisan tanah yang diakibatkan adanya beban merupakan penjumlahan dari tiga komponen penurunan dalam Persamaan 3.3 berikut ini.

$$S = S_i + S_c + S_s \quad (3.3)$$

dimana: S = Penurunan total

S_i = Penurunan segera

S_c = Penurunan akibat konsolidasi primer

S_s = Penurunan akibat konsolidasi sekunder

3.5 Analisis Stabilitas Lereng

Pada permukaan tanah yang tidak horisontal, komponen gravitasi cenderung untuk menggerakkan tanah ke bawah. Jika komponen gravitasi sedemikian besar sehingga perlawanan terhadap geseran yang dapat dikerahkan oleh tanah pada bidang longsornya terlampaui, maka akan terjadi kelongsoran lereng. Analisis stabilitas pada permukaan tanah yang miring ini, disebut analisis stabilitas lereng. Analisis stabilitas lereng ini tidak mudah, karena terdapat banyak faktor yang sangat mempengaruhi hasil hitungan. Faktor-faktor tersebut misalnya, kondisi tanah yang berlapis-lapis, kuat geser tanah yang anisotropis, aliran rembesan air dalam tanah dan lain-lain (Hardiyatmo, 2010).

3.5.1 Klasifikasi Stabilitas Lereng

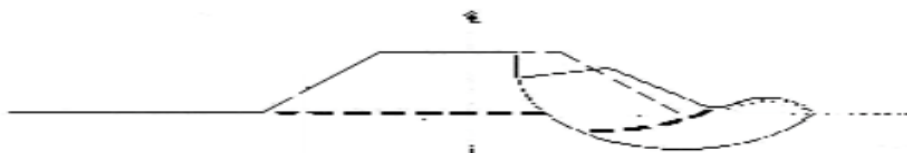
Tanah timbunan yang diperkuat dengan lapisan geosintetik mengandalkan kemampuan mekanis bahan. Sifat mekanis ini sangat dipengaruhi faktor umur layan dan ketahanan. Tidak seperti struktur sipil lainnya, elemen pendukung beban dari struktur perkuatan tanah sulit diperiksa dan dirawat, terlebih lagi aplikasi bahan tersebut digunakan dalam kondisi tertimbun tanah. Kondisi fisik dan kimia dari lingkungan yang kompleks sangat beragam dari satu titik ke titik yang lain (Kaliakin dan Dechasakulsom, 2001).

Deb dkk. (2007) juga telah menyelidiki pengaruh bahan geosintetik sebagai perkuatan dalam jangka waktu pemasangan yang panjang pada struktur tanah. Faktor jangka panjang mempengaruhi penurunan tanah dasar. Pada kasus tanah dengan modulus geser yang tinggi, tambahan penurunan akibat faktor ini dapat diabaikan. Tambahan penurunan akibat pengaruh jangka panjang berkisar antara 5 – 11%.

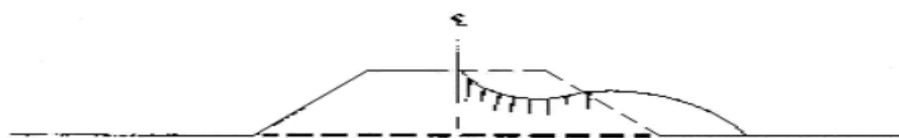
Konsep dasar penggunaan perkuatan geosintetik pada timbunan yang terletak di atas tanah lunak dapat digambarkan pada Gambar 3.2 berikut ini.



(a) Keruntuhan daya dukung



(b) Keruntuhan rotasional



(c) Keruntuhan akibat pergerakan lateral

Gambar 3.3 Konsep Perkuatan Geosintetik, (a), (b), dan (c) Perilaku Keruntuhan Timbunan

(Sumber: Holtz dkk, 1998)

Gambar 3.3 (a) memberikan gambaran kegagalan yang disebabkan oleh peningkatan tegangan air pori tanah dasar akibat beban timbunan. Hal ini menyebabkan tegangan efektif menurun, sehingga kapasitas dukung tanah dasar menjadi rendah, sehingga penurunan berlebih terjadi. Gambar 3.3 (b) menunjukkan perilaku keruntuhan lereng akibat ketidakstabilan lereng timbunan serta permasalahan kapasitas dukung tanah dasar bagian tepi yang rendah (kegagalan rotasional). Perilaku keruntuhan yang lain seperti dalam Gambar 3.3 (c), keruntuhan akibat sebaran tanah timbunan arah lateral. Keruntuhan arah lateral disebabkan oleh permasalahan ketahanan geser tanah timbunan dengan tanah dasar. Ketiga tipe keruntuhan tanah timbunan tersebut memberikan gambaran perilaku keruntuhan yang mungkin terjadi pada tanah timbunan setelah dilakukan pemasangan geosintetik. Beberapa kemungkinan keruntuhan ini digunakan sebagai pertimbangan untuk mengetahui tingkat stabilitas tanah timbunan yang

diperkuat (Pedoman Perencanaan dan Pelaksanaan Perkuatan Tanah dengan Geosintetik, DPU 2009).

3.5.2 Teori Analisis Stabilitas Lereng

Berdasarkan Hardiyatmo (2010) maksud dari analisis stabilitas adalah untuk menentukan faktor aman dari bidang longsor yang potensial. Dalam analisis stabilitas lereng, beberapa anggapan dibuat, yaitu:

1. kelongsoran lereng terjadi di sepanjang permukaan bidang longsor tertentu dan dapat dianggap sebagai masalah bidang 2 dimensi,
2. massa tanah yang longsor dianggap sebagai benda masif,
3. tanah geser dari massa tanah pada setiap titik sepanjang bidang longsor tidak tergantung dari orientasi permukaan longsor, atau dengan kata lain kuat geser tanah dianggap isotropis, dan
4. faktor aman didefinisikan dengan memperhatikan tegangan geser rata-rata sepanjang bidang longsor potensial, dan kuat geser tanah rata-rata sepanjang permukaan longsor.

Berdasarkan Hardiyatmo (2010) faktor aman didefinisikan sebagai nilai banding antara gaya yang menahan dan gaya yang menggerakkan, atau dapat dinyatakan pada Persamaan 3.4.

$$F = \tau / \tau_d \quad (3.4)$$

keterangan:

τ = tahanan geser yang dapat dikerahkan tanah (kN/m^2),

τ_d = tegangan geser yang terjadi akibat gaya berat tanah yang akan longsor (kN/m^2), dan

F = faktor aman.

Menurut teori *Mohr-Coulomb* dalam Hardiyatmo (2010), tahanan terhadap tegangan geser (τ) yang dapat dikerahkan oleh tanah, di sepanjang bidang longornya, dapat dinyatakan pada Persamaan 3.5.

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi \quad (3.5)$$

keterangan:

τ = tegangan geser (kN/m^2),

- C = kohesi (kN/m^2),
 ϕ = sudut gesek dalam tanah (derajat), dan
 σ = tegangan normal (kN/m^2).

Dengan cara yang sama, dapat dituliskan persamaan tegangan geser yang terjadi (τ_d) akibat beban tanah dan beban-beban lain pada bidang longsornya seperti pada Persamaan 3.6.

$$\tau_d = cd + \sigma \operatorname{tg} \phi_d \quad (3.6)$$

keterangan :

- τ_d = tegangan geser (kN/m^2),
 Cd = kohesi (kN/m^2),
 ϕ_d = sudut gesek dalam tanah (derajat), dan
 σ = tegangan normal (kN/m^2).

Substitusi dari Persamaan 3.5 dan 3.6 ke Persamaan 3.7 diperoleh faktor aman seperti pada Persamaan 3.8.

$$F = (cd + \sigma \operatorname{tg} \phi) / (cd + \sigma \operatorname{tg} \phi_d) \quad (3.7)$$

$$cd + \sigma \operatorname{tg} \phi_d = (c/F) + \sigma (\operatorname{tg} \phi / F) \quad (3.8)$$

Untuk maksud memberikan faktor aman terhadap masing-masing komponen kuat geser, faktor aman dapat dinyatakan pada Persamaan 3.9a dan 3.9b.

$$F = c / \frac{C}{Cd} \quad (3.9a)$$

$$F = (\operatorname{tg} \phi / \operatorname{tg} \phi_d) \quad (3.9b)$$

keterangan:

- F_c = faktor aman pada komponen kohesi, dan
 F_ϕ = faktor aman pada komponen gesekan.

Umumnya, faktor aman stabilitas lereng atau faktor aman terhadap kuat geser tanah diambil lebih besar atau sama dengan 1,2 -1,5.

Menurut Bowles (1984) dalam Heryono (2010) membedakan tingkat longsor berdasarkan faktor aman pada Tabel 3.2.

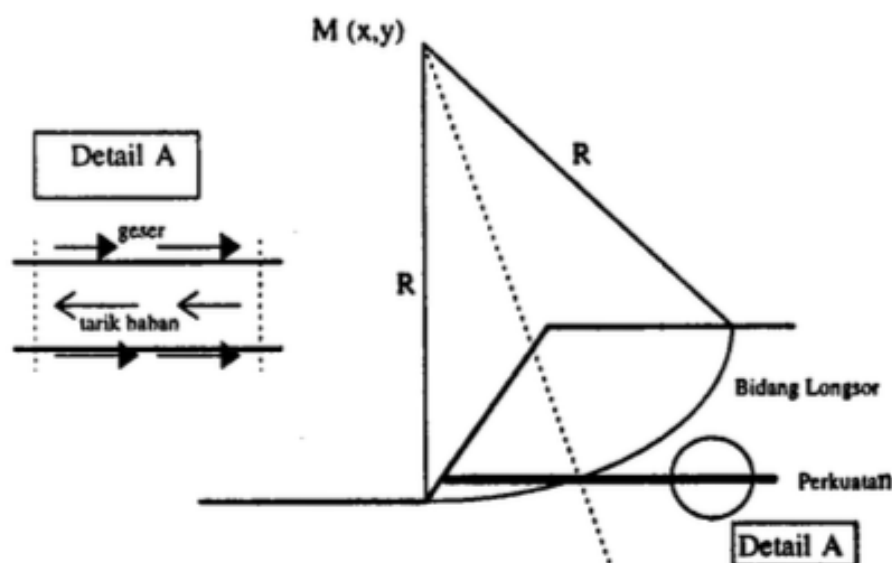
Tabel 3.2 Nilai Faktor Aman Terhadap Bidang Longsor

Faktor aman	Kejadian
$FK \leq 1,07$	Longsor sering terjadi
$1,07 < FK < 1,25$	Longsor dapat terjadi
$FK \geq 1,25$	Longsor jarang terjadi

Sumber: Bowles (1984)

3.5.3 Perkuatan Tanah Dengan Geotekstil

Pada konstruksi lereng dengan sistem perkuatan lereng, gaya yang meruntuhkan akan dilawan dengan oleh kemampuan geser dan tarik dari bahan perkuatan tersebut (Suryolelono, 1993). Pada Gambar 3.4, tampak pengaruh bahan geotekstil dalam memberikan kontribusi perlawanan terhadap gaya yang melongsorkan cukup berperan, apabila bahan tersebut terpotong oleh bidang longsor.



Gambar 3.4 Perlawanan Perkuatan Tanah Terhadap Gaya-Gaya Yang Meruntuhkan

Dalam praktek, analisis stabilitas lereng didasarkan pada konsep keseimbangan plastis batas. Adapun maksud analisis stabilitas adalah untuk menentukan faktor aman dari bidang longsor yang potensial. Faktor aman didefinisikan dengan memperhatikan tegangan geser rata-rata sepanjang bidang longsor potensial, dan kuat geser tanah rata-rata sepanjang permukaan longsor.

Analisis stabilitas lereng dengan perkuatan terdiri dari analisis stabilitas internal, stabilitas eksternal, dan stabilitas terhadap kelongsoran lereng. Stabilitas internal terdiri dari dari stabilitas terhadap putus dan cabut tulangan, yang berupa stabilitas terhadap gaya-gaya internal yang diperhitungkan terhadap panjang dan jarak spasi antar perkuatan. Stabilitas terhadap gaya-gaya eksternal terdiri dari kemampuan perkuatan lereng dalam menahan gaya geser, guling, dan keruntuhan dasar pondasi akibat kuat dukung tanah. Anggapan yang digunakan adalah perkuatan lereng tanah merupakan satu kesatuan seperti pada konstruksi dinding penahan tanah. Sedangkan tinjauan stabilitas terhadap kelongsoran lereng dapat digunakan berbagai metode, salah satunya adalah metode keseimbangan batas (Suryolelono, 1993).

1. Stabilitas Eksternal

- a. Faktor aman terhadap geser dinyatakan oleh persamaan 3.10.

$$SF = \frac{F}{\Sigma E} \geq 1,5 \quad (3.10)$$

keterangan:

F = gaya yang melawan (kN),

ΣE = jumlah gaya geser (kN).

- b. Faktor aman terhadap guling dinyatakan oleh persamaan 3.11.

keterangan:

$$SF = \frac{\Sigma M_P}{\Sigma M_A} \geq 1,5 \quad (3.11)$$

ΣM_P = jumlah momen pasif (kNm),

ΣM_A = jumlah momen aktif (kNm).

- c. Faktor aman terhadap kuat dukung tanah dinyatakan oleh persamaan 3.12.

$$SF = \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_{terjadi}} \geq 1,5 \quad (3.12)$$

Berdasarkan rumus Terzaghi untuk tegangan ultimate dapat dinyatakan oleh persamaan 3.13 berikut:

$$\sigma_{ult} = c.N_c + q.N_q + 0,5 \cdot \gamma \cdot B.N_\gamma \quad (3.13)$$

keterangan:

SF = faktor aman terhadap kuat dukung tanah,

- σ_{ult} = kuat dukung tanah (kN/m²),
 $\sigma_{terjadi}$ = tegangan yang terjadi (kN/m²),
 c = kohesi tanah pondasi (kN.m²),
 γ = berat volume tanah pondasi (kN/m³),
 q = tekanan *overburden* pada dasar pondasi (kN/m²),
 B = panjang perkuatan pada dasar konstruksi (m), dan
 N_c, N_q, N_γ = koefisien kuat dukung yang merupakan fungsi dari sudut geser dalam tanah, yang terdapat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Koefisien Daya Dukung Tanah

ϕ	N_c	N_q	N_γ	ϕ	N_c	N_q	N_γ
7	7,16	1,88	0,71	26	22,25	11,85	12,54
8	7,53	2,06	0,86	27	23,94	13,20	14,47
9	7,92	2,25	1,03	28	25,80	14,72	16,72
10	8,85	2,47	1,22	29	27,86	16,44	19,34
11	8,80	2,71	1,44	30	30,14	18,40	22,40
12	9,28	2,97	1,69	31	32,67	20,63	25,90
13	9,81	3,26	1,97	32	35,49	23,18	30,22
14	10,37	3,59	2,29	33	38,64	26,09	35,19
15	10,98	3,94	2,65	34	42,16	29,44	41,06
16	11,63	4,34	3,06	35	46,12	33,30	48,03
17	12,34	4,77	3,53	36	50,59	37,75	56,31
18	13,10	5,26	4,07	37	55,63	42,92	66,19
19	13,93	5,80	4,68	38	61,35	48,93	78,03
20	14,83	6,40	5,39	39	67,87	55,96	92,25
21	15,82	7,07	6,20	40	75,31	64,20	109,41
22	16,88	7,82	7,13	41	83,86	73,90	130,22
23	18,05	8,66	8,20	42	93,71	85,38	155,55
24	19,32	9,60	9,44	43	105,11	99,02	186,54
25	20,72	10,66	10,88	44	118,37	115,31	224,64

Sumber : Departemen Pekerjaan Umum (2009)

2. Stabilitas Internal

- a. Faktor aman terhadap putus tulangan dapat dilihat pada persamaan 3.14.

$$SF_r = \frac{T_a}{\sigma_h \times S_v} \geq 1,5 \quad (3.14)$$

keterangan:

- SF_r = faktor aman terhadap putus tulangan,
 S_v = jarak tulangan arah vertikal (m),
 T_a = kuat tarik ijin tulangan (kN/m), dan
 σ_h = tekanan horizontal tanah pada kedalam yang ditinjau (kN/m²).

b. Faktor aman terhadap cabut tulangan dapat dilihat pada persamaan 3.15.

$$SF_p = \frac{2 \times \mu \times \sigma_v \times L_e}{\sigma_h \times S_v} \geq 1,5 \quad (3.15)$$

keterangan:

SF_p = faktor aman terhadap cabut tulangan,

μ = koefisien gesek antara tanah dan tulangan, dapat diambil

$$\mu = \text{tg } (2\emptyset/3),$$

σ_v = tekanan vertikal tanah pada kedalaman yang ditinjau (kN/m²),

L_e = panjang perkuatan yang berada di belakang garis longsor (m),

σ_h = tekanan horizontal tanah pada kedalaman yang ditinjau (kN/m²), dan

S_v = jarak tulangan arah vertikal (m).

c. Panjang *overlapping*

Panjang overlap atau panjang lipatan (L_o) pada bagian penutup permukaan dinding yang diperkuat dengan geotekstil dihitung dengan persamaan 3.16.

$$L_o = \frac{\sigma_{hc} \times S_{vi} \times SF}{2 \times \gamma b \times z_i \times \text{tg } \emptyset} \geq 1 \quad (3.16)$$

dengan,

z = kedalaman tulangan yang ditekuk masuk ketanah (m),

σ_{hc} = tekanan horizontal rata-rata pada lipatan,

SF = faktor aman,

S_v = jarak tulangan arah vertical (m), dan

γ = berat volume tanah (kN/m³).

d. Panjang efektif geotekstil

Untuk menghitung panjang efektif atau panjang geotekstil yang dibutuhkan dibelakang bidang longsor, dapat digunakan Persamaan 3.17.

$$L_e = \frac{\sigma_{hc} \times S_{vi} \times SF}{2 \times \gamma b \times z_i \times \text{tg } \emptyset} \geq 1 \quad (3.17)$$

dengan,

z = kedalaman tulangan yang ditekuk masuk ketanah (m)

σ_{hc} = tekanan horizontal rata-rata pada lipatan,

- SF = factor aman
 S_v = jarak tulangan arah vertical (m)
 γ = berat volume tanah (kN/m^3)

3.5.4 Kebutuhan Geotekstil

Dalam menentukan kebutuhan geotextile, harus mencari nilai kekuatan geotekstil yang tersedia dengan menggunakan persamaan 3.18 berikut:

$$T_a = T_u / FS_{ID} \times FS_{CR} \times FS_{CD} \times FS_{BD} \quad (3.18)$$

dimana:

T_a = kekuatan geotekstil yang tersedia,

T_u = kekuatan tarik maksimal geotekstil yang dipakai,

FS_{ID} = faktor aman akibat kerusakan saat pemasangan,

FS_{CR} = faktor aman terhadap kerusakan akibat rangkai,

FS_{CD} = faktor aman terhadap kerusakan akibat bahan kimia, dan

FS_{BD} = faktor aman terhadap kerusakan akibat aktifitas biologi.

Harga – harga FS diatas dapat diambil dari Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Harga FS Menurut Kegunaan

Kegunaan	FS_{ID}	FS_{CR}	FS_{CD}	FS_{BD}
Dinding Penahan	1,1 – 2,0	2,0 – 4,0	1,0 – 1,5	1,0 – 1,3
Timbunan	1,1 – 2,0	2,0 - 3,0	1,0 – 1,5	1,0 – 1,3
Daya Dukung	1,1 – 2,0	2,0 – 4,0	1,0 – 1,5	1,0 – 1,3
Overlay Pacement	1,1 – 1,5	1,0 – 1,2	1,0 – 1,5	1,0 – 1,1
Stabilitas Talud	1,1 – 1,5	1,5 – 2,0	1,0 – 1,5	1,0 – 1,3
Unpaved Road	1,1 – 2,0	1,5 – 2,5	1,0 – 1,5	1,0 – 1,2
Pemisah	1,1 – 2,5	1,0 – 1,2	1,0 – 1,5	1,0 – 1,2

(Sumber: GRI Standard Practice GT7. Geosynthetic Institute)

3.6 Metode Elemen Hingga

Menurut Hardiyatmo (2010) dengan menggunakan metode keseimbangan batas dimungkinkan untuk melakukan evaluasi lereng dengan cepat. Tetapi, prosedur ini memberlakukan hitungan yang sama antara (1) lereng timbunan baru, (2) lereng yang baru digali atau (3) lereng alami. Tegangan-tegangan di dalam

lereng sangat dipengaruhi oleh K_0 , yaitu rasio tegangan lateral terhadap tegangan vertikal efektif. Tetapi, hitungan cara konvensional dengan metoda keseimbangan batas mengabaikan hal ini (Chowdhury, 1981 dalam Hardiyatmo, 2010). Dalam kenyataan, distribusi tegangan dalam ke tiga lereng tersebut akan berbeda, dan oleh karena itu akan mempengaruhi stabilitasnya.

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) pertama kali dikenalkan oleh Clough dan Woodward (1967) dalam Hardiyatmo (2010), tapi penggunaannya terbatas pada struktur tanah yang kompleks. Untuk kasus khusus, metode elemen hingga dapat mengakomodasi pengaruh penimbunan dan penggalian secara bertahap, sehingga pengaruh sejarah tegangan dalam tanah terhadap deformasinya dapat ditelusuri. Akan tetapi, kualitas metoda elemen hingga secara langsung bergantung pada kemampuan dari model konstitutif yang dipilih, yang secara realistis mensimulasi kelakuan non linier dari tanah pembentuk lereng. Untuk lereng galian dan lereng alam, model konstitutif hanya dapat benar-benar dikembangkan dengan uji lapangan kualitas tinggi yang didukung dengan pengamatan di lapangan.

3.6.1 Program Plaxis

Program Plaxis adalah sebuah paket program yang disusun berdasarkan metode elemen hingga yang telah dikembangkan secara khusus untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas dalam bidang rekayasa geoteknik. Prosedur pembuatan model secara grafis yang mudah memungkinkan pembuatan suatu model elemen hingga yang rumit dapat dilakukan dengan cepat (Brinkgreve, 2007).

3.6.2 Model Material *Mohr - Coulomb*

Salah satu hal yang sangat penting dalam permodelan menggunakan elemen hingga adalah menentukan model material. Model material adalah sekumpulan persamaan matematika yang menjelaskan hubungan antara tegangan-regangan. Suatu material harus dimodelkan secara mekanis menggunakan persamaan

konstitutif. Penentuan model suatu material dibuat sesuai dengan kondisi material yang ditinjau serta derajat keakuratan yang diinginkan.

Adapun model-model material dalam melakukan tahapan simulasi terhadap perilaku dari tanah, diantaranya sebagai berikut ini.

1. Model *Linier Elastic*.
2. Model *Mohr Coulomb*.
3. Model *Jointed Rock*.
4. Model *Hardening soil*.
5. Model *Soft Soil*.
6. Model *Soft Soil Creep*.

Dari beberapa model tersebut dalam penyelesaian tugas akhir ini model yang saya gunakan adalah Model *Mohr Coulomb*. Model *Mohr Coulomb* adalah model elastis-plastis yang terdiri dari lima buah parameter, yaitu E (*modulus young*) dan ν (angka Poisson) untuk memodelkan elastisitas tanah, ϕ (sudut geser) dan c (kohesi) untuk memodelkan plastisitas tanah dan Ψ sebagai sudut dilatasi. Model *Mohr Coulomb* merupakan suatu pendekatan “ordo pertama” dari perilaku tanah atau batuan. Model ini disarankan untuk digunakan dalam analisis awal dari masalah yang dihadapi. Setiap lapisan dimodelkan dengan sebuah nilai kekakuan rata-rata yang konstan. Karena kekakuan yang konstan, maka perhitungan cenderung cepat dan dapat diperoleh perkiraan awal dari bentuk deformasi dari model. Disamping kelima parameter dari model tersebut, kondisi tegangan awal dari tanah memegang peranan yang penting dalam hampir seluruh masalah deformasi tanah. Tegangan horizontal awal tanah harus ditentukan terlebih dahulu dengan menentukan nilai K_0 yang tepat (Brinkgreve, 2007).

3.6.3 Parameter Dasar Model *Mohr Coulomb*

Model *Mohr Coulomb* membutuhkan total lima buah parameter, yang umum digunakan oleh para praktisi geoteknik dan dapat diperoleh dari uji-uji yang umum dilakukan di laboratorium. Parameter-parameter tersebut bersama dimensi dasarnya adalah sebagai berikut ini.

E : *Modulus Young* [kN/m^2].

ν : Angka Poisson [-].

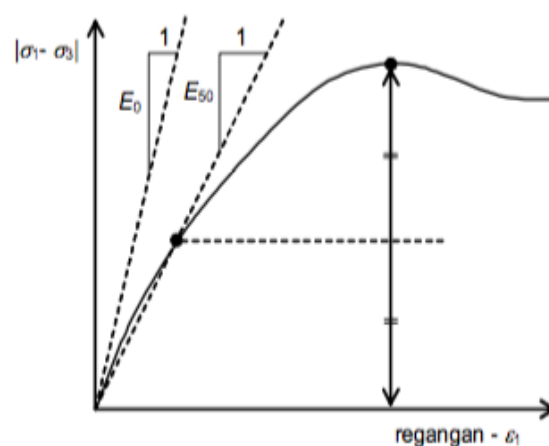
φ : Sudut geser [$^{\circ}$].

c : Kohesi [kN/m^2].

ψ : Sudut dilatansi [$^{\circ}$].

3.6.3.1 Modulus Young (E)

Plaxis menggunakan *Modulus Young* sebagai modulus kekakuan dasar dalam model elastis dan model *Mohr Coulomb*, tetapi beberapa modulus alternatif juga ditampilkan. Modulus kekakuan mempunyai dimensi sama dengan dimensi tegangan. Nilai dari parameter kekakuan yang digunakan dalam suatu perhitungan memerlukan perhatian khusus karena kebanyakan material tanah menunjukkan perilaku yang non-linier dari awal pembebanan. Dalam mekanika tanah, kemiringan awal dari kurva tegangan- regangan umumnya dinotasikan sebagai E_0 dan modulus sekan pada 50% kekuatan dinotasikan sebagai E_{50} (lihat Gambar 3.5). Untuk material dengan rentang elastisitas linier yang lebar maka penggunaan E_0 adalah realistis, tetapi untuk masalah pembebanan pada tanah, umumnya digunakan E_{50} . Pada pengurangan beban, seperti pada kasus terowongan dan galian, perlu digunakan E_{UR} dan bukan E_{50} .



Gambar 3.5 Definisi E_0 dan E_{50} Untuk Hasil Uji Triaksial Terdrainase Standar

Untuk tanah, modulus pengurangan beban E_{UR} dan modulus pembebanan

E_{50} cenderung semakin meningkat terhadap peningkatan tekanan keliling (*confining pressure*) yang bekerja. Karena itu, lapisan tanah yang dalam cenderung mempunyai kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan dengan lapisan tanah yang dangkal. Terlebih lagi, kekakuan dari tanah bergantung pada lintasan tegangan yang dilalui. Kekakuan akan jauh lebih tinggi untuk kasus pengurangan beban dibandingkan dengan kasus peningkatan pembebanan. Selain itu, kekakuan tanah yang dinyatakan dengan *modulus Young* dapat lebih rendah pada kasus pembebanan (terdrainase) dibandingkan pada kasus penggeseran. Karena itu, saat menggunakan modulus kekakuan yang konstan untuk menyatakan perilaku tanah perlu ditentukan sebuah nilai yang konsisten terhadap tingkat tegangan dan lintasan tegangan yang dilalui.

3.6.3.2 Angka Poisson (ν)

Uji triaksial terdrainase standar dapat menghasilkan pengurangan volume yang signifikan pada awal pemberian beban aksial, yang menghasilkan konsekuensi berupa nilai angka Poisson awal (ν_0) yang rendah. Pada beberapa kasus, khususnya pada masalah pengurangan beban, mungkin realistis untuk menggunakan nilai awal yang rendah, tetapi pada penggunaan model *Mohr Coulomb*, secara umum direkomendasikan menggunakan nilai yg tinggi.

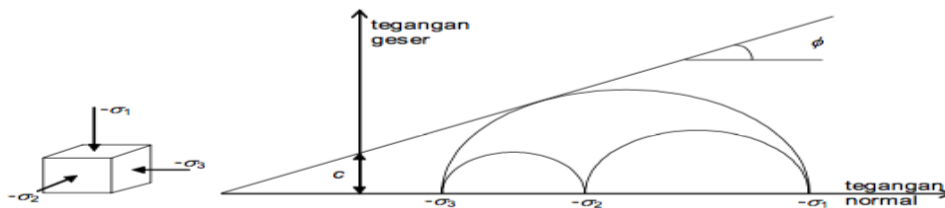
Penentuan angka Poisson cukup sederhana jika model elastis atau model *Mohr Coulomb* digunakan untuk pembebanan gravitasi (dengan meningkatkan $\Sigma Mweight$ dari 0 ke 1 pada perhitungan plastis). Untuk pembebanan seperti ini Plaxis harus memberikan rasio yang realistis dari $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$. Karena kedua model tersebut akan menghasilkan nilai rasio yang dikenal luas yaitu $\sigma_h / \sigma_v = \nu / (1 - \nu)$ untuk kompresi satu dimensi, maka dengan mudah dapat dipilih angka Poisson yang menghasilkan nilai K_0 yang realistis dapat dengan mudah dilakukan. Karena itu nilai ν dievaluasi dengan mencocokkan nilai K_0 . Dalam banyak kasus akan diperoleh nilai ν yang berkisar antara 0,3 dan 0,4. Umumnya, nilai tersebut tidak hanya digunakan pada kompresi satu dimensi, tetapi juga dapat digunakan untuk kondisi pembebanan lainnya.

3.6.3.3 Kohesi (c)

Kekuatan berupa kohesi mempunyai dimensi tegangan. Plaxis dapat menangani pasir non-kohesif ($c = 0$), tetapi beberapa pilihan tidak akan berjalan dengan baik. Untuk menghindari hal ini, pengguna yang belum berpengalaman disarankan untuk memasukkan nilai yang kecil untuk kohesi (gunakan $c > 0,2$ kPa).

3.6.3.4 Sudut Geser (ϕ)

Nilai sudut geser, ϕ (*phi*), dimasukkan dalam dimensi derajat. Sudut geser yang tinggi, seperti pada pasir padat, akan mengakibatkan peningkatan beban komputasi plastis.



Gambar 3.6 Lingkaran-Lingkaran Tegangan Saat Mengalami Leleh; Satu Lingkaran Menyentuh Garis Keruntuhan *Coulomb*

Waktu komputasi akan meningkat kurang-lebih secara eksponensial terhadap sudut geser. Karena itu, sudut geser yang tinggi sebaiknya dihindari saat melakukan perhitungan awal untuk suatu proyek tertentu. Sudut geser akan menentukan kuat geser seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6 dengan menggunakan lingkaran tegangan *Mohr*. Kriteria keruntuhan *Mohr Coulomb* telah terbukti lebih baik untuk menyatakan perilaku tanah dibandingkan dengan aproksimasi dari *Drucker-Prager*, dimana bidang runtuh dari model *Drucker-Prager* cenderung tidak akurat untuk konfigurasi *axi-simetri*.

3.6.3.5 Sudut Dilatasi (ψ)

Sudut dilatasi, ψ (*psi*), dinyatakan dalam derajat. Selain tanah lempung

yang terkonsolidasi sangat berlebih, tanah lempung cenderung tidak menunjukkan dilatasi sama sekali (yaitu $\psi = 0$). Dilatasi dari tanah pasir bergantung pada kepadatan serta sudut gesernya. Untuk pasir kwarsa besarnya dilatasi kurang lebih adalah $\psi \approx \phi - 30^\circ$. Walaupun demikian, dalam kebanyakan kasus sudut dilatasi adalah nol untuk nilai ϕ kurang dari 30° . Nilai negatif yang kecil untuk ψ hanya realistis untuk tanah pasir yang sangat lepas.