

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Tanah

Tanah merupakan material yang terdiri dari agregat atau butiran mineral padat yang tidak terikat secara kimia satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong diantara partikel-partikel tersebut (Das,1995).

Tanah terbentuk dari terjadinya pelapukan batuan menjadi partikel-partikel yang lebih kecil akibat proses mekanis dan kimia. Pelapukan mekanis disebabkan oleh memuai dan menyusutnya batuan karena perubahan panas dan dingin secara terus menerus yang akhirnya mengakibatkan hancurnya batuan tersebut. Tiga bagian yang membentuk tanah yaitu udara, air, dan partikel-partikel tanah itu sendiri kemudian membentuk gumpalan yang mempunyai massa total tanah.

Craig (1980) menjelaskan bahwa tanah dapat divisualisasikan sebagai suatu partikel padat tanah (*solid skeleton*) yang membatasi pori-pori yang mengandung air maupun udara. Volume kerangka tanah secara keseluruhan dapat berubah akibat penyusunan kembali partikel-partikel padat pada posisinya yang baru, terutama dengan cara menggelinding dan menggelincir yang mengakibatkan terjadinya perubahan gaya-gaya yang bekerja diantara partikel-partikel tanah. Pada tanah jenuh, pengurangan volume terjadi bila sebagian airnya dapat melepaskan diri dan keluar dari pori-pori. Pada tanah kering atau jenuh sebagian, pengurangan volume selalu mungkin terjadi akibat kompresi udara dalam pori-pori, dan terdapat suatu ruang kembali partikel tanah.

3.1.1 Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah merupakan sistem pengaturan beberapa jenis tanah yang berbeda tetapi mempunyai sifat yang serupa ke dalam kelompok-kelompok dan subkelompok-subkelompok berdasarkan pemakaiannya. Sistem klasifikasi tanah memberikan suatu bahasa yang mudah dipahami untuk menjelaskan secara

singkat sifat-sifat umum tanah yang sangat bervariasi tanpa penjelasan yang terperinci (Das, 1995).

Jenis dan sifat tanah yang sangat bervariasi ditentukan oleh perbandingan banyaknya fraksi (kerikil, pasir, lanau dan lempung), sifat plastisitas butir halus. Klasifikasi tanah bertujuan untuk membagi tanah menjadi beberapa golongan tanah dengan kondisi dan sifat yang serupa diberi simbol nama yang sama.

Sebagian besar sistem klasifikasi tanah yang telah dikembangkan untuk tujuan rekayasa berdasarkan sifat-sifat indeks tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran dan plastis. Ada dua buah sistem klasifikasi tanah yang biasa digunakan, yaitu Sistem Klasifikasi AASHTO dan Sistem Klasifikasi USCS.

1. Sistem Klasifikasi AASHTO

Sistem klasifikasi AASHTO pada umumnya berguna untuk menentukan kualitas tanah guna pekerjaan jalan yaitu lapis dasar (*subbase*) dan tanah dasar (*subgrade*).

Sistem ini didasarkan pada kriteria sebagai berikut :

a. Ukuran butir

Kerikil : bagian tanah yang lolos saringan dengan diameter 75 mm dan tertahan pada saringan diameter 2 mm (No.10).

Pasir : bagian tanah yang lolos saringan dengan diameter 2 mm dan tertahan pada saringan diameter 0,0075 mm (No.200).

Lanau dan Lempung : bagian tanah yang lolos saringan dengan diameter 0,0075 mm (No.200).

b. Plastis

Nama berlanau dipakai apabila bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai Indeks Plastisitas (IP) sebesar 10 atau kurang. Nama berlempung dipakai apabila bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastisitas sebesar 11 atau lebih.

- c. Apabila ditemukan batuan dengan ukuran lebih besar dari 75 mm dalam contoh tanah yang akan diuji maka batuan-batuan tersebut harus dikeluarkan terlebih dahulu, tetapi persentasi dari batuan yang dikeluarkan tersebut harus dicatat.

Sistem klasifikasi AASHTO membagi ke dalam 7 kelompok besar yaitu A-1 sampai dengan A-7. Tanah berbutir dimana 35% atau kurang dari jumlah butiran tanah tersebut lolos ayakan No.200 diklasifikasikan ke dalam kelompok A-1, A-2, dan A-3. Tanah berbutir dimana lebih dari 35% butiran tanah tersebut lolos ayakan No.200 diklasifikasikan ke dalam kelompok A-4, A-5, A-6, dan A-7. Butiran dalam kelompok A-4 sampai dengan A-7 tersebut sebagian besar adalah lanau dan lempung. Untuk mengklasifikasikan tanah berdasarkan sistem klasifikasi AASHTO, maka data yang didapat dari hasil uji laboratorium dicocokkan dengan angka-angka yang diberikan dalam Tabel 3.1. Kelompok tanah dari sebelah kiri adalah kelompok tanah baik dalam menahan beban roda, juga baik untuk lapisan dasar tanah jalan. Sedangkan semakin ke kanan kualitasnya semakin berkurang.

Tabel 3.1 Sistem Klasifikasi Tanah Berdasarkan AASHTO

Klasifikasi Umum	Tanah Granuler ¹					
	A-1 A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2 A-2-5	A-2-6
Persen lolos saringan :						
No. 10	50 max		51 min			
No. 40	30 max	50 max				
No. 200	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max
Batas cair ^a			NP	40 max	41 min	40 max
Indek Plastisitas ^a	6 max			10 max	10 max	11 min
Fraksi tanah	Kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil dan pasir lanau atau lempung		
Kondisi kuat dukung	Sangat baik hingga baik					
Klasifikasi Umum	Tanah Granuler	Tanah Mengandung Lanau-Lempung ²				
	A-2 A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 ^b A-7-6 ^c	
Persen lolos saringan :						
No. 10						
No. 40						
No. 200	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min	36 min
Batas cair ^a	41 min	40 max	41 min	40 max	40 max	41 min
Indek Plastisitas ^a	11 min	10 min	10 max	10 min	10 min	11 min
Fraksi tanah	Kerikil, pasir lanau/lempung	Lanau		Lempung		
Kondisi kuat dukung	Sangat baik hingga baik	Kurang baik hingga jelek				

(sumber : Das,1995)

2. Klasifikasi Tanah Menurut USCS

Sistem klasifikasi ini pada awalnya diperkenalkan oleh Casagrande pada tahun 1942 untuk digunakan pada pekerjaan pembuatan lapangan terbang yang dilaksanakan oleh *The Army Corps of Engineers* selama Perang Dunia II. Dalam rangka kerja sama dengan *United States Bureau of Reclamation* pada tahun 1952, sistem ini disempurnakan (Das, 1995).

Kemudian *American Society for Testing and Materials* (ASTM) memakai USCS sebagai metode standar untuk mengklasifikasikan tanah. Dalam bentuk sekarang, sistem ini banyak digunakan dalam berbagai pekerjaan geoteknik. Sistem klasifikasi USCS mengklasifikasikan tanah ke dalam dua kategori utama, yaitu:

- a. Tanah berbutir kasar (*coarse-grained soil*), yaitu tanah kerikil dan pasir yang kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos dari saringan No.200. Simbol untuk kelompok ini adalah G untuk kerikil atau tanah berkerikil dan S untuk pasir atau tanah berpasir. Selain itu juga dinyatakan gradasi tanah dengan symbol W untuk tanah bergradasi baik dan P untuk tanah bergradasi buruk.
- b. Tanah berbutir halus (*fine-grained soil*), yaitu tanah yang lebih dari 50% berat total contoh tanah lolos dari saringan No.200. Simbol kelompok ini adalah M untuk lanau anorganik, C untuk lempung anorganik, dan O untuk lanau organik dan lempung organik. Simbol PT digunakan untuk tanah gambut (*peat*), dan tanah dengan kandungan organik tinggi. Plastisitas dinyatakan dengan L untuk plastisitas rendah dan H untuk plastisitas tinggi.

Selanjutnya, tanah diklasifikasikan dalam sejumlah kelompok dan sub-kelompok yang dapat dilihat dalam Tabel 3.2 dan 3.3

Tabel 3.2 Klasifikasi Tanah Berbutir Kasar Berdasarkan USCS

Jenis	Simbol	Nama Kelompok	Kriteria Klasifikasi		
Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar tertahan saringan No.4	GW	Kerikil gradasi baik, sedikit atau tidak mengandung fraksi halus	$F_{200} < 5\%$ $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$, dan $1 < C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} < 3$	Tanah memiliki symbol ganda jika $5\% \leq F_{200} \leq 12\%$, yaitu : a) GW-GM, jika $C_c > 4$, $1 < C_u < 3$, $PI < 4\%$ b) GW-GC, jika $C_c > 4$, $1 < C_u < 3$, $PI > 7\%$. c) GP-GM, jika tidak memenuhi kriteria GW dan $PI < 4\%$ d) GP-GC, jika tidak memenuhi kriteria GW dan $PI > 7\%$	
	GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir – kerikil, sedikit atau tidak mengandung fraksi halus	$F_{200} < 5\%$ C_u dan C_c tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW		
	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil – pasir - lanau	$F_{200} > 12\%$, dan $PI < 4\%$ (berada di bawah garis-A)		Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol ganda, GM-GC.
	GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil – pasir - lempung	$F_{200} > 12\%$, dan $PI > 7\%$ (berada di atas garis A)		
Pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos saringan No.4	SW	Pasir gradasi baik, berkerikil, sedikit atau tidak mengandung fraksi halus	$F_{200} < 5\%$ $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ dan $1 < C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} < 3$	Tanah memiliki symbol ganda jika $5\% \leq F_{200} \leq 12\%$, yaitu : a) SW-SM, jika $C_c > 4$, $1 < C_u < 3$, $PI < 4\%$ b) SW-SC, jika $C_c > 4$, $1 < C_u < 3$, $PI > 7\%$. c) SP-SM, jika tidak memenuhi kriteria GW dan $PI < 4\%$ d) SP-SC, jika tidak memenuhi kriteria GW dan $PI > 7\%$	
	SP	Pasir gradasi buruk, berkerikil, sedikit atau tidak mengandung fraksi halus	$F_{200} < 5\%$ C_u dan C_c tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW		
	SM	Pasir berlanau, campuran pasir - lanau	$F_{200} > 12\%$, dan $PI < 4\%$ (berada di bawah garis-A)		Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol ganda, SM-SC.
	SC	Pasir berlempung, campuran pasir - lempung	$F_{200} > 12\%$, dan $PI > 7\%$ (berada di atas garis A)		

(sumber : Das,1995)

Tabel 3.3 Klasifikasi Tanah Berbuti Halus Berdasarkan USCS

Jenis	Simbol	Nama Kelompok	Kriteria
Lanau dan lempung dengan batas cair, $LL < 50\%$	ML	Lanau inorganik dan pasir sangat halus atau pasir halus berlanau atau berlempung	$PI < 4$ atau berada di bawah garis-A dalam Grafik Plastisitas (Gambar 23).
	CL	Lempung inorganik dengan plastisitas rendah hingga sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus (<i>lean clays</i>)	$PI > 7$ dan berada pada atau di bawah garis-A dalam Grafik Plastisitas (Gambar 23).
	CL-ML	Lanau berlempung inorganik, dengan pasir halus atau sedikit kerikil.	PI berada dalam daerah yang diarsir (<i>hatched area</i>) dalam Gambar 23.
	OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah	PI berada dalam daerah OL dalam Gambar 23 dan $\frac{LL_{(oven\ dried)}}{LL_{(not\ dried)}} < 0,75$
Lanau dan lempung dengan batas cair $LL > 50\%$	MH	Lanau inorganik atau pasir halus <i>diatomae</i> , lanau elastis	PI berada dibawah garis-A dalam Grafik Plastisitas (Gambar 23)
	CH	Lempung inorganik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk (<i>fat clays</i>)	PI berada diatas garis-A dalam Grafik Plastisitas (Gambar 23)
	OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi	PI berada dalam daerah OH dalam Gambar 23 dan $\frac{LL_{(oven\ dried)}}{LL_{(not\ dried)}} < 0,75$
Tanah dengan kadar organik tinggi	Pt	Gambut (<i>peat</i>), dan tanah lain kandungan organik tinggi	

(sumber : Das,1995)

3.1.2 Kuat Geser Tanah

Kuat geser tanah adalah kemampuan tanah untuk melawan tegangan geser yang terjadi pada saat terbebani. Keruntuhan geser (*shear failure*) tanah terjadi bukan disebabkan karena hancurnya butiran tanah tersebut tetapi karena adanya gerak relative antara butiran tanah tersebut (Budi Santoso, dkk.,1998)

Parameter kuat geser tanah diperlukan untuk analisis-analisis kapasitas dukung tanah, stabilitas lereng, dan gaya dorong pada dinding penahan tanah.

Menurut teori Mohr (1910, dalam Hardiyatmo, 2010), kondisi keruntuhan suatu bahan terjadi oleh akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal dan tegangan geser.

Kuat geser tanah menurut (Hardiyatmo, 2010), adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butiran tanah terhadap desakan atau tarikan. Dengan dasar pengertian ini, bila pembebanan akan ditahan oleh :

- a. Kohesi tanah yang bergantung pada jenis tanah dan kepadatannya, tetapi tidak tergantung dari tegangan normal yang bekerja pada bidang geser.
- b. Gesekan antara butir-butir tanah yang besarnya berbanding lurus dengan tegangan normal pada bidang gesernya

Coulomb (1776, dalam Hardiyatmo, 2010) mendefinisikan $f(\sigma)$ seperti pada Persamaan 1.

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (1)$$

dengan :

τ = Kekuatan geser tanah (kN/m^2)

c = Kohesi (kN/m^2)

σ = Tegangan normal (kN/m^2)

φ = Sudut geser dalam tanah ($^\circ$)

Berdasarkan konsep Terzaghi (1925, dalam Hardiyatmo, 2010) mengubah persamaan Coulomb dalam bentuk tegangan efektif seperti pada Persamaan 2a dan Persamaan 2b.

$$\tau = c' + (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi' \quad (2a)$$

Karena, $\sigma' = (\sigma - u)$, maka

$$\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi' \quad (2b)$$

dengan :

c' = Kohesi tanah efektif (kN/m^2)

σ' = Tegangan normal efektif (kN/m^2)

u = Tekanan air pori (kN/m^2)

φ' = Sudut geser dalam tanah efektif ($^\circ$)

3.1.3 Penyelidikan Tanah

Hardiyatmo (2002b) menjelaskan bahwa penyelidikan mendetail dengan pengeboran yang diikuti dengan pengujian di laboratorium dan atau di lapangan, selalu dilakukan untuk penyelidikan tanah pada proyek-proyek besar, seperti : gedung bertingkat, jembatan, bendungan, bangunan-bangunan industri, dan lain-lainnya. Bergantung pada maksud dan tujuannya, penyelidikan dapat dilakukan dengan cara menggali lubang uji (*test-pit*), pengeboran, dan uji secara langsung di lapangan (*in-situ test*). Dari data yang diperoleh, sifat-sifat teknis dipelajari, kemudian digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam menganalisis kapasitas dukung dan penurunan.

Tujuan penyelidikan tanah, antara lain :

1. menentukan sifat-sifat tanah yang terkait dengan perancangan struktur yang akan dibangun di atasnya,
2. menentukan kapasitas dukung tanah menurut tipe fondasi yang akan dipilih,

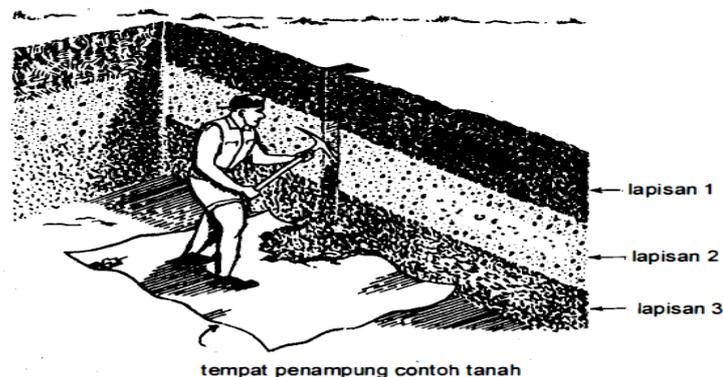
3. mengetahui propertis suatu tanah,
4. untuk mengetahui posisi muka air tanah,
5. untuk memprediksi besarnya penurunan, dan
6. menentukan besarnya tekanan tanah terhadap dinding penahan tanah atau pangkal jembatan (*abutment*),

3.1.3.1 Alat-alat Penyelidikan Tanah

Menurut Hardiyatmo (2002b) data dari hasil penyelidikan tanah dapat memberikan gambaran tentang kondisi-kondisi lapisan pada sifat-sifat fisik tanah dalam arah vertikal. Berdasarkan data ini, perancang dituntut untuk menggambar profil lapisan tanah dengan cara interpolasi data dari tiap-tiap lapisan yang mengandung material-material yang secara pendekatan mempunyai sifat-sifat yang sama. Terdapat beberapa cara penyelidikan yang berguna untuk mengetahui kondisi lapisan tanah dan sifat-sifat teknisnya akan disampaikan berikut ini.

1. Lubang Uji (*test pit*)

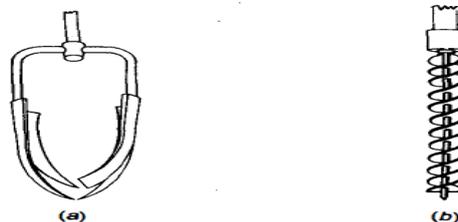
Cara ini berguna untuk mengetahui kondisi lapisan tanah dengan teliti. Lagi pula, bila perlu dapat mengambil contoh tanah tak terganggu (*undisturbed sample*) pada lapisan-lapisan yang dikehendaki. Adapun pemeriksaan dengan cara lubang uji dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1 Pemeriksaan Tanah Dengan Cara Lubang Uji (Hardiyatmo, 2002b)

2. Bor Tangan (*hand auger*)

Cara ini termasuk yang paling sederhana pada pembuatan lubang dalam tanah dengan menggunakan alat bor. Alat bor seperti pada Gambar 3.2a, hanya dapat digunakan apabila tanah mempunyai kohesi yang cukup, sehingga lubang bor dapat tetap stabil di sepanjang lubangnya. Alat ini tidak dapat digunakan pada pasir yang terendam air. Penetrasi mata bor terbatas pada kekuatan tangan yang memutarinya, oleh karena itu tanah harus tidak mengandung batu atau lapisan tanah keras lainnya. Bor tangan dapat menembus sampai 10m, tapi umumnya kedalaman bor maksimum 6 sampai 8 meter. Alat ini biasanya digunakan dalam penyelidikan tanah untuk proyek-proyek jalan raya, kereta api, dan lapangan terbang, dimana kedalaman lubang yang dibutuhkan pada jalan raya hanya berkisar pada kedalaman 4m. Untuk pembuatan lubang yang lebih dalam pada tanah kohesif, bor ulir dapat digunakan seperti Gambar 3.2b.



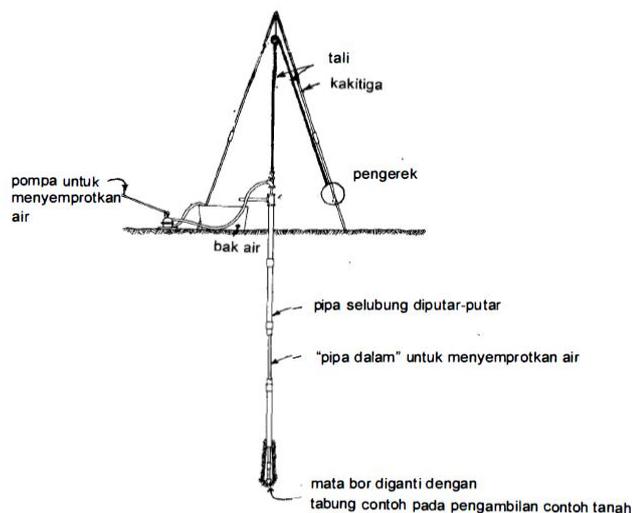
Gambar 3.2 Bor Tangan (Hardiyatmo,2002b)

- (a) Mata bor tangan untuk tanah kohesif
- (b) Bor ulir

3. Bor Cuci (*wash boring*)

Pada cara ini pengeboran tanah dilakukan dengan cara penyemprotan air sambil memutar-mutar pipa selubung (*casing*) untuk memudahkan penetrasi ujung mata bor seperti pada Gambar 3.3. Tanah yang diambil merupakan contoh terganggu (*disturbed*) yang terangkut keluar bersama aliran air. Tanah yang keluar dari lubang bor diidentifikasi secara kasar. Pengambilan contoh tanah dilakukan secara kering dengan cara mengganti ujung mata bor

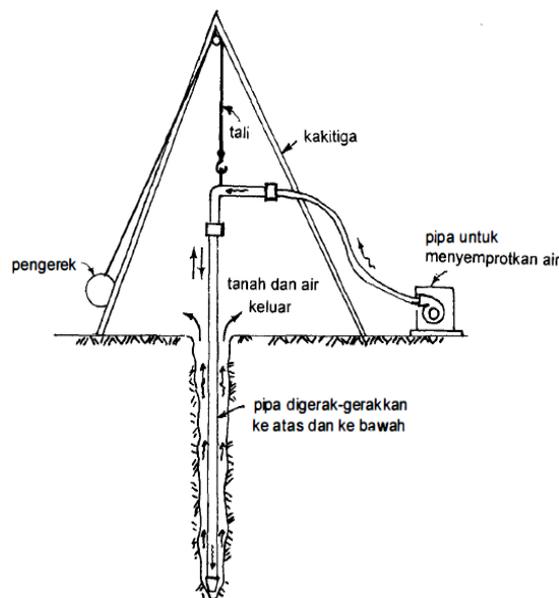
dengan tabung contoh. Cara ini tidak mengganggu tanah dibawah mata bor . Oleh karena itu, contoh tanah yang diambil memungkinkan dalam kondisi tak terganggu (*undisturbed sample*). Metode bor cuci tidak bisa digunakan jika tanah mengandung batu-batu besar.



Gambar 3.3 Pengujian Dengan Cara Bor Cuci (Hardiyatmo, 2002b)

4. Penyelidikan dengan pencucian (*wash Probing*)

Wash probing digunakan untuk mengetahui kedalaman pertemuan antara tanah lunak dan tanah keras atau padat. Caranya yaitu air yang bertekanan tinggi disemprotkan melalui pipa yang digerakan keatas dan kebawah pada lubang yang tak dilindung pipa seperti pada Gambar 3.4. Cara ini biasanya dilakukan untuk penyelidikan tanah di pelabuhan dan penentuan lapisan tanah dibawah dasar sungai, yang dimaksudkan untuk menentukan kedalaman pasir atau lanau yang terletak di atas lapisan keras atau batu. Hal tersebut terutama digunakan untuk pekerjaan pemancangan dan pengerukan.



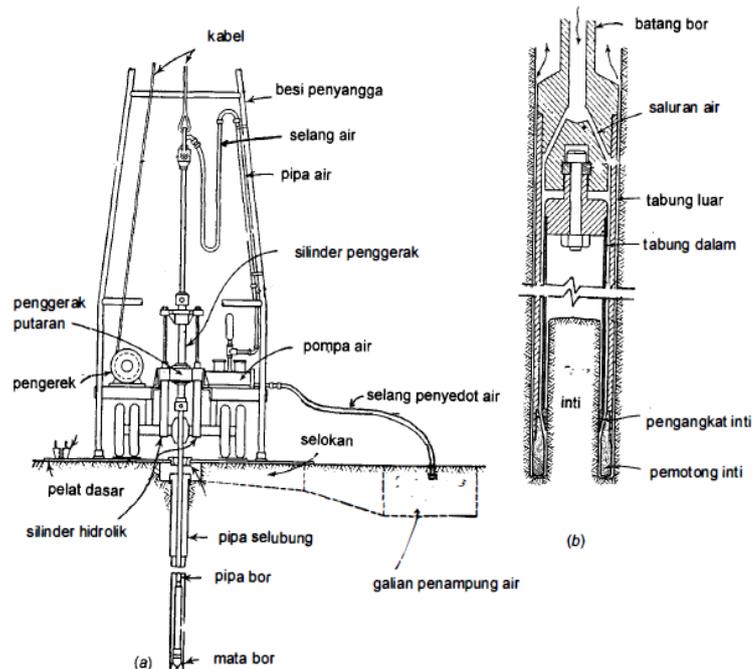
Gambar 3.4 Penyelidikan Dengan Cara Pencucian Tanah(Hardiyatmo, 2002b)

5. Bor Putar (*rotary drill*)

Penyelidikan tanah dengan bor putar atau bor mesin seperti pada Gambar 3.5a dapat dilakukan untuk semua jenis tanah. Alat bor putar yang digerakan menggunakan mesin dapat menembus lapisan tanah keras atau batu sampai kedalaman lebih dari 40 m. Alat ini dapat digunakan pada lapisan tanah keras, batu, tanah lempung dan bahkan tanah pasir.

Pengeboran inti dilakukan bila pengeboran menembus lapisan batu, dan bila pada penyelidikan diinginkan untuk memperoleh *contoh inti kontinu (continous core sample)*. Putaran batang bor menekan ujung matan bor. Tabung inti luar berputar bersama dengan batang bor dan menekan ke lapisan keras atau batu di bawahnya. Mata bor dipasang pada ujung alat bornya. Putaran mata bor membentuk gerusan yang berbentuk cincin. Contoh *inti batu* masuk kebagian tengah mata bor dan sekaligus masuk kedalam *tabung inti dalam*, yang dibuat tidak ikut berputar. Selama pengeboran,air disirkulasikan lewat batang bor yang berlubang. Contoh bentuk mata bor dari *type double-tube core barrel*, ditunjukkan dalam Gambar 3.5b. Pengeboran dapat dilakukan tanpa

menggunakan pipa selubung (casing). Jika lubang cenderung akan longsor, dilakukan pengeboran dengan memasukkan kedalam lubang bor suatu cairan kental dari bahan lempung vulkanik *tiksotropik* dan air. Cairan ini berfungsi untuk menahan sisi lubang bor dan menutupi pori-pori tanah yang lolos air sekeliling lubang bor.



Gambar 3.5 Alat Bor Putar (*Rotary Drilling Ring*) (Hardiyatmo , 2002b)

- (a) Skema alat bor putar
(b) *Doble-tube core barrel*

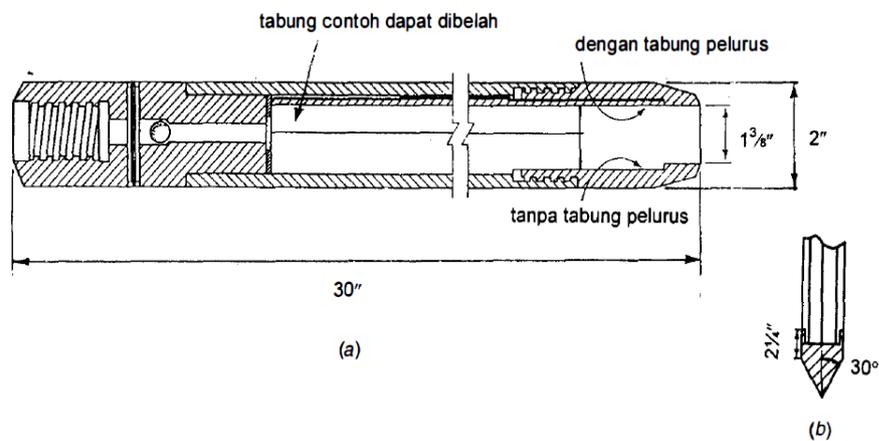
3.1.3.2 Penyelidikan Tanah di Lapangan

Menurut Hardiyatmo (2002b) Pengujian di lapangan sangat berguna untuk mengetahui karakteristik tanah dalam mendukung beban fondasi dengan tidak dipengaruhi oleh kerusakan contoh tanah akibat pengeboran dan penanganan contohnya. Khususnya dapat berguna untuk menyelidiki tanah lempung sensitif, lanau, dan tanah pasir tak padat.

Terdapat cara penyelidikan dilapangan yaitu salah satunya dengan cara penetrasi yang akan disampaikan berikut ini.

1. *Standard Penetration Test (SPT)*

Sewaktu melakukan pengeboran inti, jika pengeboran telah mencapai kedalaman lapisan yang akan diuji, mata bor dilepas kemudian diganti dengan alat yang disebut *tabung belah standar (standard split barrel sampler)* seperti pada Gambar 3.6. Setelah tabung dipasang, bersama-sama dengan pipa bor, alat diturunkan sampai ujungnya menumpu pada lapisan tanah dasar, kemudian dipukul dari atas. Pukulan diberikan oleh alat pemukul yang beratnya 63,5 kg (140 pon), yang ditarik naik turun dengan tinggi jatuh 76,2 cm (30 inci).

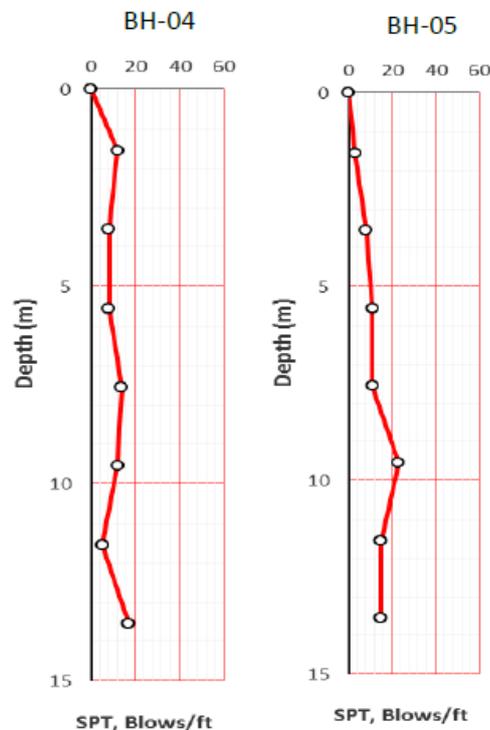


Gambar 3.6 Tabung Belah Standar Untuk Pengujian SPT (Hardiyatmo, 2002b)

(a) Tabung standar

(b) Tabung SPT untuk tanah berbatu

Adapun contoh hasil pengujian SPT dapat dilihat pada Gambar 3.7 berikut ini.



Gambar 3.7 Contoh Hasil Pengujian SPT

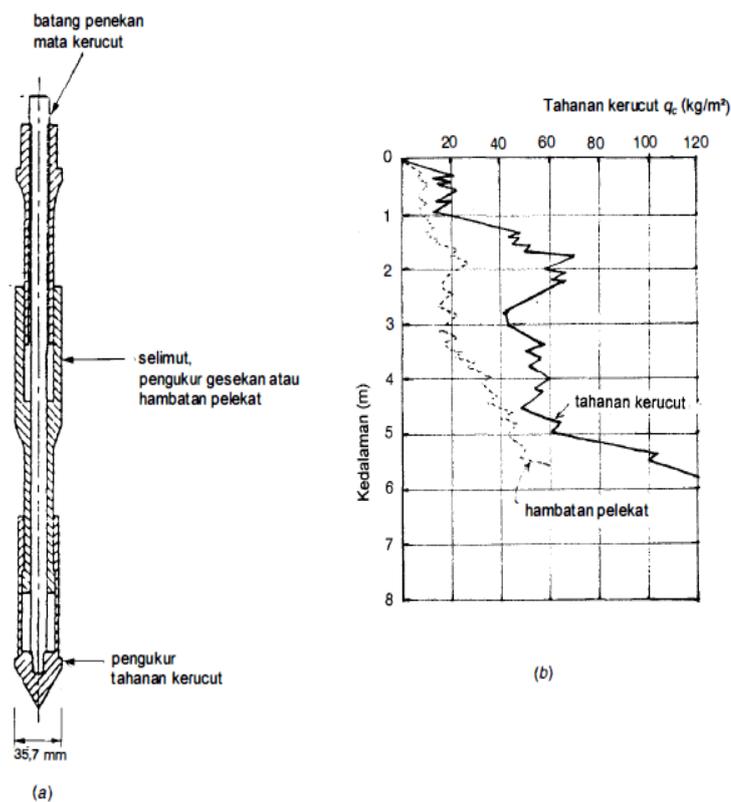
(Sumber. PT. LAPIITB, 2016)

2. Cone Penetration Test (CPT)

Pengujian ini sangat berguna untuk memperoleh nilai variasi kepadatan tanah pasir yang tidak padat. Pada tanah pasir yang padat serta tanah berkerikil dan berbatu, penggunaan alat sondir menjadi tidak efektif dikarenakan akan banyak mengalami kesulitan dalam menembus tanah.

Ujung alat ini terdiri dari kerucut baja yang mempunyai sudut kemiringan 60° dan berdiameter 35,7 mm atau mempunyai luas penampang 1000 mm^2 . Bentuk skematis dan cara kerja alat ini dapat dilihat pada Gambar 3.7a. Alat sondir dibuat sedemikian rupa untuk dapat mengukur tahanan ujung dan tahanan terhadap gesekan dari selimut silinder mata sondirnya. Cara penggunaan alat ini adalah dengan cara menekan pipa penekan dan mata sondir secara terpisah, melalui alat

penekan mekanis atau dengan tangan yang memberikan gerakan ke bawah. Kecepatan penekanan kira-kira 10 mm/detik. Pembacaan arloji pengukur, dilakukan pada saat setiap penembusan sedalam 20 cm. Tahanan ujung serta tahanan gesekan selimut alat sondir dicatat. Dari sini diperoleh grafik sondir yang menjadikan nilai keduanya, ditunjukkan dalam Gambar 3.8b.

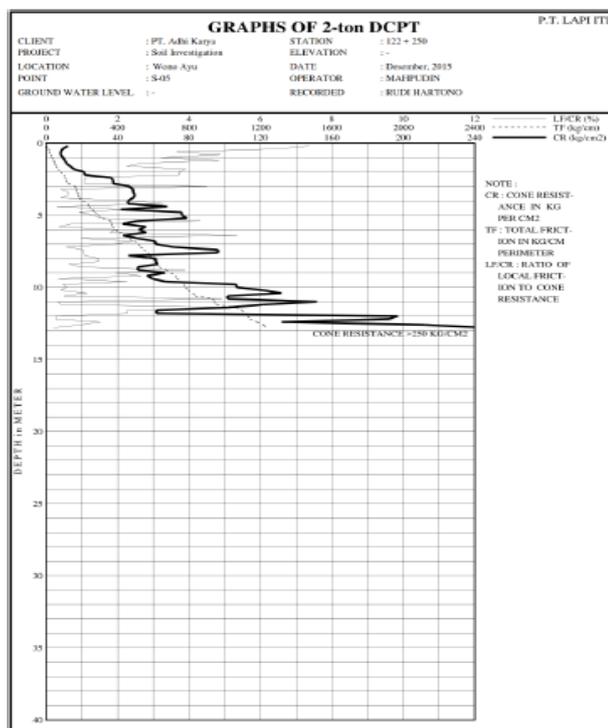


Gambar 3.8 Pengujian Sondir (Hardiyatmo, 2002b)

(a) Gambar skematis alat pengujian

(b) Contoh hasil pengujian

Adapun contoh hasil pengujian CPT dapat dilihat pada Gambar 3.9 berikut ini.



Gambar 3.9 Contoh Hasil Pengujian CPT

(Sumber. PT. LAPIITB, 2016)

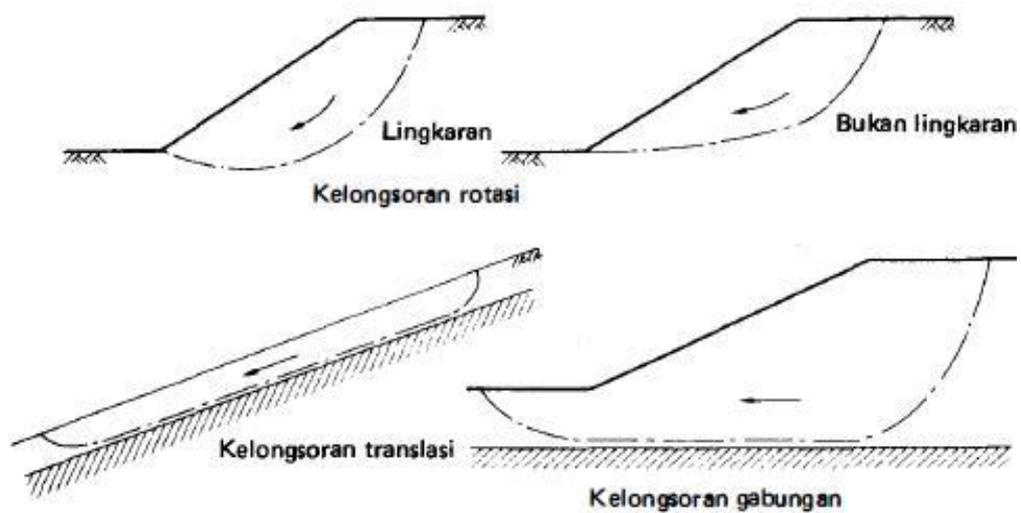
3.2 Stabilitas Lereng

Menurut Craig (1989), gaya-gaya gravitasi dan rembesan (*seepage*) cenderung mengakibatkan ketidakstabilan (*instability*) pada lereng alami (*natural slope*), pada lereng yang dibentuk dengan cara penggalian, dan pada lereng tanggul serta bendungan tanah (*earth dams*).

Ada 3 tipe utama dari kelongsoran tanah seperti pada Gambar 3.10, yaitu sebagai berikut :

- Kelongsoran rotasi (*rotational slips*), kelongsoran yang bentuk permukaan runtuh pada potongannya dapat berupa busur lingkaran atau kurva bukan lingkaran.

- b. Kelongsoran translasi (*translational slips*), cenderung terjadi bila lapisan tanah yang berbatasan berada pada kedalaman yang relatif dangkal di bawah permukaan lereng.
- c. Kelongsoran gabungan (*compound slips*), terjadi bila lapisan tanah yang berbatasan berada pada kedalaman yang lebih dalam. Hal ini umumnya terjadi karena runtuhnya terdiri dari potongan kurva dan bidang.



Gambar 3.10 Tipe-tipe Keruntuhan Lereng (Craig, 1989)

Hardiyatmo (2002a) menjelaskan bahwa dalam praktek, analisis stabilitas lereng didasarkan pada konsep keseimbangan plastis batas (*limit plastic equilibrium*). Adapun maksud dari analisis stabilitas adalah untuk menentukan faktor aman dari bidang longsor yang potensial. Dengan diketahuinya faktor keamanan dapat memudahkan pekerjaan pembentukan atau perkuatan lereng untuk memastikan apakah lereng tersebut mempunyai resiko longsor atau cukup stabil. Dalam analisis stabilitas lereng, beberapa anggapan dibuat, yaitu (Hardiyatmo, 2002a) :

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. Tahanan 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.
4. Faktor aman didefinisikan dengan memperhatikan tegangan geser rata-rata sepanjang bidang longsor potensial, dan kuat geser tanah rata-rata sepanjang permukaan longsor. Jadi, kuat geser tanah mungkin terlampaui di titik-titik tertentu pada bidang longsornya, padahal faktor aman hasil hitungan lebih dari 1.

Faktor aman didefinisikan sebagai nilai banding antara gaya yang menahan dan gaya yang menggerakkan, atau seperti Persamaan 3 berikut ini.

$$F = \frac{\tau}{\tau_d} \quad (3)$$

Dengan τ adalah tahanan geser maksimum yang dapat dikerahkan oleh tanah, τ_d adalah tegangan geser yang terjadi akibat gaya berat tanah yang akan longsor, dan F adalah faktor aman.

3.2.1 Analisis Stabilitas Lereng untuk Lereng tak Terhingga

Pada daerah pergunungan sering terdapat lereng yang sangat panjang yang dimana lapisan tanah paling atas adalah lempung dan dibawahnya adalah lapisan keras dengan permukaan sejajar dengan permukaan tanah. Pada keadaan tersebut, bidang geser biasanya terdapat pada batas kedua lapisan tanah ini. Kelongsoran ini disebut kelongsoran *translational* seperti terlihat pada Gambar 3.11. Untuk menentukan kestabilannya, lereng tersebut dianggap tak terhingga. Dengan demikian, dapat dihitung keseimbangan statis pada satu segmen saja (Wesley, 1977)

Persamaan faktor aman dapat dilihat pada Persamaan 4 berikut ini.

$$F = \frac{c}{\gamma H \cos^2 \alpha \tan \alpha} + \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha} \quad (4)$$

Dengan,

F = Faktor aman

c = Kohesi (kN/m^2)

φ = Sudut geser dalam tanah ($^\circ$)

α = Sudut kemiringan lereng ($^\circ$)

γ = Berat volume tanah (kN/m^3)

Untuk tanah yang mempunyai φ dan c , ketebalan tanah pada kondisi kritis (H_c) terjadi bila $F = 1$, yaitu seperti Persamaan 5 berikut ini.

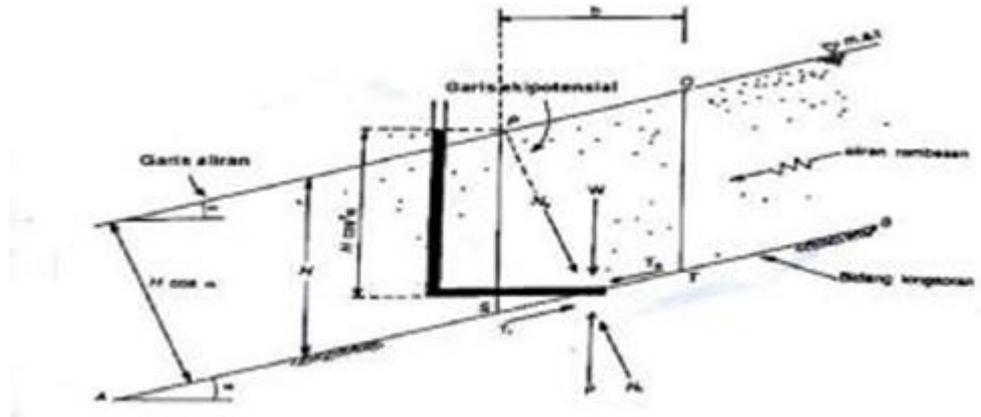
$$H_c = \frac{c}{\gamma \cos^2 \alpha (\tan \alpha - \tan \varphi)} \quad (5)$$

Dengan H_c merupakan ketebalan maksimum, dimana lereng dalam kondisi kritis akan longsor.

2) Kondisi dengan Rembesan Penuh (Tanah Jenuh Penuh)

Suatu lereng tak terhingga dengan kemiringan lereng sebesar α , dan muka air tanah dianggap terdapat pada permukaan tanah, diperlihatkan pada Gambar 3.13. Dengan adanya pengaruh air, kuat geser tanah dapat dituliskan seperti Persamaan 2.

Ditinjau elemen $PQTS$, gaya-gaya yang akan bekerja pada permukaan-permukaan PS dan QT besarnya sama, jadi saling meniadakan. Selanjutnya akan dievaluasi faktor aman terhadap kemungkinan longsor di sepanjang bidang AB yang terletak pada kedalaman H di bawah permukaan tanah.



Gambar 3.13 Lereng Tak Terhingga Dengan Aliran Rembesan (Hardiyatmo, 2002a)

Persamaan faktor aman diperoleh dari :

Berat tanah pada elemen PQTS adalah seperti Persamaan 6.

$$W = \gamma_{sat} bH \quad (6)$$

Gaya berat oleh tanah jenuh W dapat diuraikan menjadi seperti Persamaan 7 dan Persamaan 8.

$$N_a = W \cos \alpha = \gamma_{sat} bH \cos \alpha \quad (7)$$

$$T_a = W \sin \alpha = \gamma_{sat} bH \sin \alpha \quad (8)$$

Tegangan normal total (σ) dan tegangan geser (τ) pada bidang AB adalah seperti Persamaan 9 sampai dengan Persamaan 12 berikut ini.

$$\sigma = \gamma_{sat} H \cos \alpha \quad (9)$$

$$\tau_d = \gamma_{sat} H \cos \alpha \sin \alpha \quad (10)$$

$$\tau_d = C_d + (\sigma - u) \tan \varphi_d \quad (11)$$

$$u = \gamma_w H \cos^2 \alpha \quad (12)$$

Substitusikan Persamaan 9 ke Persamaan 11 seperti Persamaan 13.

$$\tau_d = C_d + \gamma' H \cos^2 \alpha \tan \varphi_d \quad (13)$$

Substitusikan persamaan 10 ke persamaan 13 seperti Persamaan 14.

$$\frac{cd}{\gamma_{sat} H} = \cos^2 \alpha \left[\tan \alpha - \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}} \tan \varphi_d \right] \quad (14)$$

Dengan demikian faktor aman pada masing-masing komponen kuat geser yaitu seperti Persamaan 15.

$$\tan \varphi_d = \frac{\tan \varphi}{F} \text{ dan } c_d = \frac{c}{F} \quad (15)$$

Maka akan diperoleh persamaan faktor aman seperti Persamaan 16.

$$F = \frac{c}{\gamma H \cos^2 \alpha \tan \alpha} + \frac{\gamma' \tan \varphi}{\gamma_{sat} \tan \alpha} \quad (16)$$

Dengan :

F = Faktor aman

C = Kohesi (kN/m^2)

φ = Sudut geser tanah ($^\circ$)

α = Sudut kemiringan lereng ($^\circ$)

γ_{sat} = Berat volume jenuh tanah (kN/m^2)

γ' = Berat volume jenuh tanah (kN/m^2)

Persamaan untuk mencari berat volume jenuh tanah yaitu seperti Persamaan 17 dan Persamaan 18.

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (17)$$

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_w(G_s + e)}{1 + e} \quad (18)$$

Dengan :

γ = *Unit weight*

γ_w = Berat isi air (*Unit weight of water*)

G = Berat jenis (*Specific gravity*)

w = Kadar air (*Water content*)

e = *Void ratio*

3.2.2 Metode Irisan (*Fellenius*)

Berdasarkan Hardiyatmo (2014) analisis stabilitas lereng cara Fellenius menganggap gaya-gaya yang bekerja pada sisi kanan-kiri dari sembarang irisan mempunyai resultan nol pada arah tegak lurus bidang longsor dengan anggapan ini keseimbangan arah vertikal dan gaya-gaya yang bekerja dengan memberikan tekanan air pori adalah seperti Persamaan 19.

$$N_i + U_i = W_i \cos \theta_i$$

Atau

$$\begin{aligned} N_i &= W_i \cos \theta_i - U_i \\ &= W_i \cos \theta_i - u_i a_i \end{aligned} \quad (19)$$

Faktor aman didefinisikan sebagai,

$$\begin{aligned} F &= \frac{\text{Jumlah momen dari tahanan geser sepanjang bidang longsor}}{\text{Jumlah momen dari berat massa tanah yang longsor}} \\ &= \frac{\sum Mr}{\sum Md} \end{aligned}$$

Lengan momen dari berat massa tanah tiap irisan adalah $R \sin \theta$, maka akan seperti Persamaan 20 berikut ini.

$$\sum Md = R \sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i \quad (20)$$

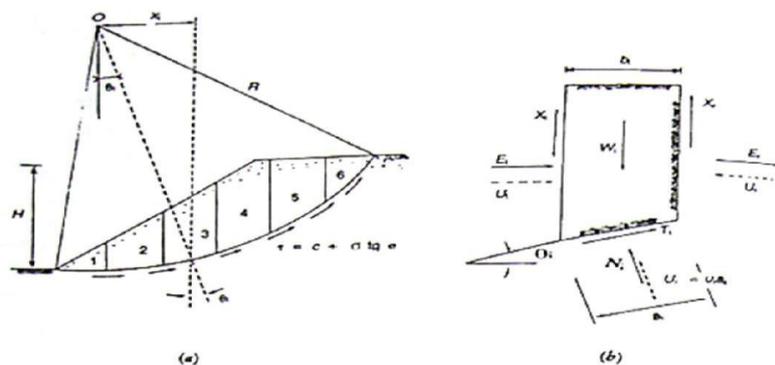
Dengan,

R = jari-jari lingkaran bidang longsor

n = jumlah irisan

W_i = berat massa tanah irisan ke- i

θ_i = sudut yang didefinisikan seperti pada Gambar 3.14



Gambar 3.14 Gaya-gaya Yang Bekerja Pada Irisan

(sumber: Taylor, 1948)

Dengan cara yang sama, momen yang menahan tahanan longsor, adalah seperti Persamaan 21.

$$\sum Md = R \sum_{i=1}^{i=n} (c a_i + H_i \operatorname{tg} \varphi) \quad (21)$$

Sehingga persamaan untuk faktor aman menjadi seperti Persamaan 22.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (c a_i + N_i \operatorname{tg} \varphi)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \quad (22)$$

Bila terdapat air pada lereng, tekanan air pori pada bidang longsor tidak menambah momen akibat tanah yang akan longsor (M_d), karena resultan gaya akibat tekanan air pori lewat titik pusat lingkaran. Substitusi Persamaan 19 ke Persamaan 22, diperoleh Persamaan 23 berikut ini.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} c a_i + (W_i \cos \theta_i - U_{i a_i}) \operatorname{tg} \varphi}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \quad (23)$$

Dengan,

F = faktor aman

C = kohesi Tanah (kN/m^2)

φ = sudut gesek dalam tanah ($^\circ$)

a_i = panjang lengkung lingkaran pada irisan ke-I (m)

W_i = berat irisan tanah ke-I (kN)

U_i = tekanan air pori pada irisan ke-I (kN/m^2)

θ_i = sudut yang didefinisikan dalam Gambar 3.14 ($^\circ$)

Metode *Fellenius* menghasilkan faktor aman yang lebih rendah dari cara hitungan yang lebih teliti. Besarnya nilai kesalahan tergantung dari faktor aman, sudut pusat lingkaran yang dipilih, dan besarnya tekanan air pori. Walaupun analisis ditinjau dalam tinjauan tegangan total, kesalahan analisis masih merupakan fungsi dari faktor aman dan sudut pusat lingkaran. Cara ini telah banyak digunakan dalam praktek, karena cara perhitungan sederhana dan kesalahan hitungan yang dihasilkan masih pada sisi yang sama.

3.3 Perkuatan Tanah

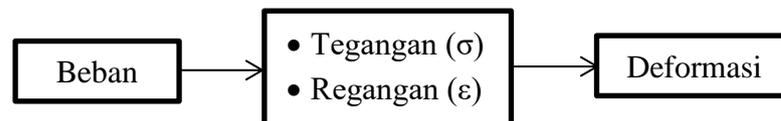
Tanah dilapangan pada umumnya bersifat lepas, mudah tertekan, mempunyai permeabilitas yang tinggi dan sifat-sifat lain yang tidak sesuai untuk suatu proyek pembangunan, maka tanah tersebut perlu diberi perkuatan. Teknik perkuatan tanah yang berkembang hingga saat ini yaitu menggunakan material yang mempunyai sifat fleksibelitas relatif tinggi (Purwanto,2012)

Keruntuhan atau kelongsoran yang terjadi bukan karena tarikan atau tekanan antar butiran-butiran tanah, tetapi disebabkan oleh tergulingnya atau tergelincirnya butiran-butiran tanah. Dengan mengetahui tipe keruntuhan yang terjadi, maka perkuatan tanah dapat diterapkan pada bidang longsor dengan cara meletakkan material perkuatan tanah, penjangkaran (*soil nailing*) dan sebagainya.

3.3.1 Dasar-dasar Perkuatan Tanah

1. Konsep Tegangan-Regangan

Salah satu fungsi terpenting dalam studi mekanika tanah yaitu perkiraan mengenai besarnya ‘tegangan’ akibat suatu beban atau pembebanan yang dapat menghasilkan deformasi yang berlebihan disebut ‘Tegangan Runtuh’, dapat dilihat pada Gambar 3.15



Gambar 3.15 Tegangan dan Regangan

2. Masa Tanah

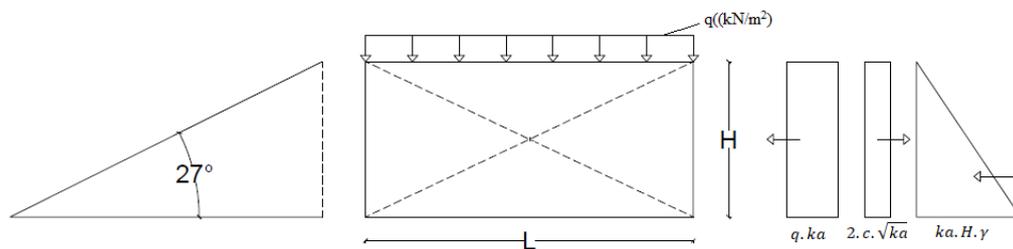
Tanah merupakan material berbutir yang tidak saling terikat atau terlepas satu sama lainnya. Butiran tanah mengandung mineral Organik dan Non- Organik. Keruntuhan pada masa tanah akibat beban atau gaya, terutama disebabkan oleh tergelincir dan tergulingnya butiran-butiran (*soils movement*) dan bukan oleh karena tarikan atau tekanan butiran-butiran tanah. Oleh karena itu sifat keruntuhan :

- a. Tegangan yang ditinjau adalah Tegangan Geser, sedangkan kekuatannya yang ditinjau adalah Kuat Geser.

- b. “Keruntuhan” merupakan suatu perubahan keadaan pada struktur tanah yang disertai dengan “deformasi” pada zona tegangan sampai deformasi itu berhenti. Deformasi total yang dihasilkan adalah:
1. Deformasi akibat tegangan-tegangan sampai tanah tersebut menjadi runtuh
 2. Deformasi yang terjadi setelah keruntuhan. Kekuatan tanah setelah runtuh disebut “Kekuatan Sisa” (*Residual Strength*).

3.3.2 Perkuatan Dengan Geotekstil

Analisis stabilitas lereng dengan perkuatan terdiri dari analisis stabilitas eksternal dan stabilitas internal. Stabilitas eksternal terdiri dari stabilitas terhadap geser, guling, eksentrisitas, dan kapasitas dukung tanah. Stabilitas internal berupa stabilitas terhadap gaya-gaya internal yang diperhitungkan terhadap panjang geotekstil (*overlapping*) dan panjang efektif geotekstil. Adapun diagram distribusi tekanan tanah lateral pada lereng dapat dilihat pada Gambar 3.16.



Gambar 3.16 Diagram Distribusi Tekanan Tanah Lateral

Untuk mendapatkan jarak arah vertikal antar lapis geotekstil (S_v) dapat dilakukan dengan Persamaan 24 sampai dengan Persamaan 26 berikut ini.

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \left(\frac{\varphi}{2} \right) \right) \quad (24)$$

$$\sigma_{hc} = q \cdot k_a - 2 \cdot c \cdot \sqrt{k_a} + k_a \cdot H \cdot \gamma \quad (25)$$

$$S_v = \frac{T_a}{\sigma_{hc} \cdot SF} \quad (26)$$

Dengan,

Ka	= koefisien tanah aktif
σ_{hc}	= tekanan horizontal rata-rata pada lipatan (kN/m^2)
q	= beban merata (kN/m^2)
SF	= faktor aman
S_v	= jarak tulangan arah vertikal (m)
γ	= berat volume tanah (kN/m^3)
c	= kohesi (kN/m^2)
Ta	= kuat tarik geotekstil allowable

a. Stabilitas Eskternal

1. Stabilitas Terhadap Geser

Faktor aman terhadap geser dinyatakan pada Persamaan 27.

$$SF = \frac{L \cdot (q + \gamma b) \cdot \tan \phi}{(q \cdot ka \cdot H + Ka \cdot H^2 \cdot \gamma b - 2 \cdot c \cdot \sqrt{Ka} \cdot H)} \quad (27)$$

2. Stabilitas Terhadap Guling

Faktor aman terhadap guling dinyatakan pada Persamaan 28

$$SF = \frac{L^2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot q + \frac{1}{2} \cdot \gamma b \cdot H \right)}{(1/2 \cdot q \cdot ka \cdot H^2 + 1/6 \cdot Ka \cdot H^3 \cdot \gamma b - c \cdot \sqrt{Ka} \cdot H^2)} \quad (28)$$

3. Stabilitas Terhadap Eksentrisitas

Nilai $\frac{1}{6}L$ harus lebih besar dari nilai eksentrisitas yang dinyatakan pada

Persamaan 29.

$$\frac{1}{6}L \geq e$$

$$\frac{1}{6}L \geq \frac{\left(\frac{1}{2} \cdot q \cdot Ka \cdot H^2 + \frac{1}{6} \cdot Ka \cdot H^3 \cdot \gamma b - c \cdot \sqrt{Ka} \cdot H^2 \right)}{(q \cdot L + \gamma b \cdot H \cdot L)} \quad (29)$$

4. Stabilitas Terhadap Kapasitas Dukung Tanah

Faktor keamanan terhadap kapasitas dukung tanah dinyatakan pada Persamaan 30 sampai dengan Persamaan 32.

$$SF = \frac{\sigma_{ult}}{q_{ult}} \quad (30)$$

$$q_{ult} = c \cdot N_c + 0,5 \cdot L \cdot \gamma b \cdot N_\gamma \quad (31)$$

$$\sigma_{ult} = c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0,5 \cdot L \cdot \gamma b \cdot N_\gamma \quad (32)$$

b. Stabilitas Internal

1. Panjang Geotekstil “Overlapping”

Panjang geotekstil *overlapping* dinyatakan pada Persamaan 33 berikut ini.

$$L_0 = \frac{\sigma_{hc} \cdot S_{vi} \cdot SF}{2 \cdot Z_i \cdot \gamma b \cdot \tan \varphi} \quad (33)$$

Dengan,

L_0 = Panjang geotekstil *overlapping* (m)

σ_{hc} = tekanan horizontal rata-rata pada lipatan (kN/m²)

SF = faktor aman

S_v = jarak tulangan arah vertikal (m)

γ = berat volume tanah (kN/m³)

φ = sudut gesek dalam tanah (°)

Z_i = kedalaman tulangan yang ditekuk masuk ke tanah (m)

2. Panjang Efektif Geotekstil

Panjang efektif geotekstil dinyatakan pada Persamaan 34 berikut ini.

$$L_{ef} = \frac{SF \cdot S_{vi} \cdot K_a \cdot \gamma b \cdot Z_i}{2 \cdot Z_i \cdot \gamma b \cdot \tan \varphi} \quad (34)$$

Dengan,

L_{ef} = Panjang efektif geotekstil (m)

SF = faktor aman

S_v = jarak tulangan arah vertikal (m)

γ = berat volume tanah (kN/m³)

φ = sudut gesek dalam tanah (°)

Z_i = kedalaman tulangan yang ditekuk masuk ke tanah (m)

K_a = koefisien tanah aktif

3.4 Konsolidasi

3.4.1 Pendahuluan

Bila lapisan tanah jenuh berpermeabilitas rendah diberi beban, maka tekanan air pori dalam tanah tersebut segera bertambah. Perbedaan tekanan pori pada lapisan tanah, menyebabkan air mengalir ke lapisan tanah dengan tekanan air pori yang lebih rendah, yang diikuti penurunan tanahnya. Karena permeabilitas pada tanah yang rendah, proses ini membutuhkan waktu. Konsolidasi merupakan proses berkurangnya rongga pori dari tanah jenuh berpermeabilitas rendah akibat dari pembebanan, dimana prosesnya dipengaruhi oleh kecepatan terperasnya air pori keluar dari rongga tanah. Proses konsolidasi dapat diamati dengan pemasangan *piezometer*, untuk dapat mencatat perubahan tekanan air pori dengan waktunya. Besarnya penurunan dapat diukur dengan berpedoman pada titik referensi ketinggian pada tempat tertentu (Hardiyatmo, 2002a).

3.4.2 Indeks Pemampatan (C_c) (*Compression Index*)

Indeks pemampatan atau indeks kompresi (C_c) merupakan kemiringan dari bagian lurus grafik e - $\log p'$. Untuk dua titik yang terletak pada bagian lurus dari grafik dalam Gambar 3.17 nilai C_c dinyatakan oleh Persamaan 35 berikut ini.

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log p'} = \frac{e_1 - e_2}{\log p'_2 - \log p'_1} = \frac{e_1 - e_2}{\log \left(\frac{p'_2}{p'_1} \right)} \quad (35)$$

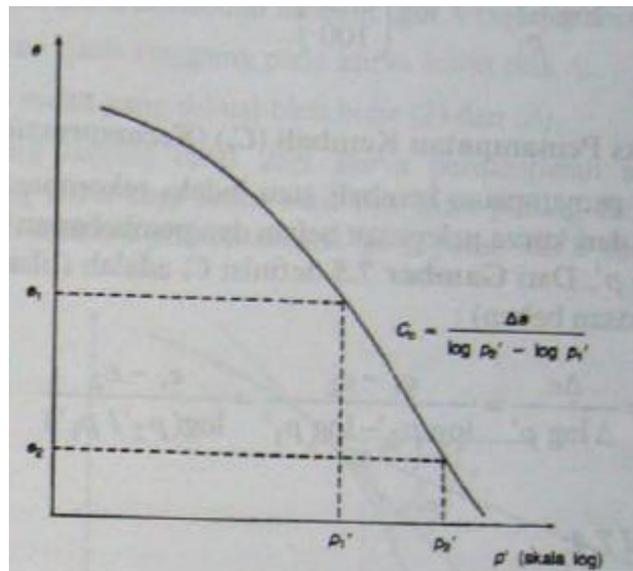
Dari penelitian, untuk tanah *normally consolidated*, Terzaghi dan Peck (1967) mengusulkan nilai C_c seperti pada Persamaan 36 berikut ini.

$$C_c = 0,009 (LL - 10) \quad (36)$$

Dengan LL adalah batas cair (*liquid limit*). Persamaan ini digunakan untuk tanah lempung anorganik yang mempunyai sensitivitas rendah sampai sedang dengan kesalahan 30% (persamaan ini sebaiknya tidak digunakan pada sensitivitas lebih besar dari 4).

Terzaghi dan Peck juga mengusulkan hubungan yang sama dengan tanah lempung dibentuk kembali (*remolded*) seperti pada Persamaan 37 dan gambar hubungan grafik indeks pemampatan C_c dapat dilihat pada Gambar 3.17 .

$$C_c = 0,007 (LL - 100) \quad (37)$$



Gambar 3.17 Indeks Pemampatan, C_c

(Sumber: Hardiyatmo, 2002a)

Beberapa nilai C_c yang didasarkan pada sifat-sifat tanah pada tempat-tempat tertentu yang diberikan oleh Azzous (1976) dapat dilihat pada Persamaan 38 sampai dengan Persamaan 41.

$$C_c = 0,01 w_N \text{ (untuk lempung Chicago)} \quad (38)$$

$$C_c = 0,0046 (LL - 9) \text{ (untuk lempung Brasilia)} \quad (39)$$

$$C_c = 0,208e_o + 0,0083 \text{ (untuk lempung Chicago)} \quad (40)$$

$$C_c = 0,0115 w_N \text{ (untuk tanah organik, gambut)} \quad (41)$$

Dengan w_N adalah kadar air asli di lapangan dalam (%) dan e_o adalah angka pori.

3.4.3 Koefisien Konsolidasi (C_v) (*Coefficient of Consolidation*)

Kecepatan penurunan konsolidasi dapat dihitung menggunakan koefisien konsolidasi C_v . Kecepatan penurunan perlu diperhitungkan bila penurunan konsolidasi yang terjadi pada struktur diperkirakan besar. Bila penurunan sangat kecil. Kecepatan penurunan sejalan dengan waktunya tidak menghasilkan perbedaan yang berarti.

Derajat konsolidasi untuk sembarang waktu ditentukan dengan menggambarkan grafik penurunan vs, waktu untuk satu beban tertentu yang diterapkan pada alat konsolidasi. Caranya, yaitu dengan mengukur penurunan total pada akhir fase konsolidasi. Kemudian, dari data penurunan dan waktu sembarang waktu yang dihubungkan dengan derajat konsolidasi rata-rata tertentu (misalnya $U = 50\%$) ditentukan. Walaupun fase konsolidasi telah selesai, yaitu ketika tekanan air pori telah nol, benda uji di dalam alat konsolidasi masih terus mengalami penurunan akibat konsolidasi sekunder. Oleh karena itu, tekanan air pori mungkin perlu diukur selama proses pembebanan atau suatu interpretasi data penurunan dan waktu harus di buat untuk menentukan kapan konsolidasi telah selesai. Kecuali, jika sejumlah kecil udara terhisap masuk ke dalam air pori akibat penurunan tekanan pori dari lokasi aslinya di lapangan, kemungkinan terdapat juga penurunan yang berlangsung dengan cepat, yang bukan bagian dari proses konsolidasi. Oleh karena itu, tinggi awal atau saat kondisi sebelum adanya penurunan saat permulaan proses konsolidasi juga harus diinterpretasikan.

3.4.4 Perhitungan Penurunan Konsolidasi

Ditinjau pada lapisan tanah lempung jenuh dengan tebal H . karena adanya beban yang bekerja, lapisan tanah menerima tambahan tegangan geser sebesar (Δp) . Dianggap regangan arah lateral nol. Pada akhir konsolidasi, terdapat tambahan tegangan efektif vertikal sebesar (Δp) . Sebagai akibat penambahan tegangan dari p_o' ke p_1' (dengan $p_1' = p_o' + \Delta p$) terjadi pengurangan angka pori dari e_o ke e_1 . Pengurangan volume persatuan

volume lempung dinyatakan oleh persamaan angka pori pada Persamaan 42.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta H}{H} = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (42)$$

dengan:

V = Volume awal

H = Tebal lapisan tanah awal

ΔV = Perubahan volume

ΔH = Perubahan tebal

e_0 = Angka pori awal

e_1 = Angka pori pada perubahan volume tertentu

Δe = Perubahan angka pori

Karena regangan lateral nol, pengurangan volume per volume satuan sama dengan pengurangan tebal persatuan tebalnya, yaitu penurunan persatuan ketinggian atau panjangnya. Besarnya penurunan lapisan tanah setebal dh dapat dinyatakan dalam Persamaan 43 di bawah ini.

$$\begin{aligned} dS_c &= \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} dh \\ &= \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} \frac{p_1' - p_0'}{1 + e_0} dh \\ &= m_v \Delta p dh \end{aligned} \quad (43)$$

Dengan S_c adalah penurunan konsolidasi primer total atau ultimit. Untuk penurunan lapisan tanah dengan tebal H , maka persamaan menjadi seperti Persamaan 44.

$$S_c = \int_0^H m_v \Delta p dh \quad (44)$$

Jika m_v dan Δp dianggap sama pada sembarang kedalaman tanah, maka diperoleh persamaan penurunan konsolidasi primer total seperti Persamaan 45.

$$S_c = m_v \Delta p dh \quad (45)$$

Jika ingin menghitung besarnya penurunan konsolidasi dengan menggunakan nilai m_v dan Δp , maka pada sembarang kedalaman lapisan

yang ditinjau nilai keduanya ditentukan dan penurunan dihitung dengan menambahkan secara aljabar dari penurunan pada tiap lapisan. Nilai tambahan regangan Δp dapat ditentukan dengan memperhatikan distribusi tegangan akibat beban fondasi pada setiap lapisan yang ditinjau. Penurunan konsolidasi primer total adalah jumlah dari penurunan tiap lapisannya, yaitu pada Persamaan 46.

$$Sc = \sum m_{vi} \Delta p dh \quad (46)$$

Persamaan konsolidasi dengan menggunakan grafik e-log p' adalah sebagai berikut ini.

Pada Persamaan 42, bila $\Delta H = Sc$, maka dapat dibuat persamaan umum menjadi seperti Persamaan 47.

$$Sc = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} H = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H \quad (47)$$

Untuk lempung tertentu, penurunan konsolidasi primer total dinyatakan oleh persamaan-persamaan berikut ini.

Bila didefinisikan seperti Persamaan 48.

$$P'_1 = P'_0 + \Delta p \quad (48)$$

1. Penurunan untuk lempung *normally consolidated* ($P'_c = P'_0$) dengan tegangan efektif sebesar p'_1 seperti pada Persamaan 49.

$$Sc = Cc \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{p'_0 + \Delta p}{p'_0} \quad (49)$$

2. Penurunan lempung *overconsolidated* ($P'_c > P'_0$) penurunan konsolidasi primer total dinyatakan oleh persamaan yang bergantung nilai P'_1 seperti pada Persamaan 50 dan Persamaan 51.

- a. Bila, $P'_1 < P'_c$

$$Sc = Cr \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{p'_1}{p'_0} \quad (50)$$

- b. Bila, $P'_1 > P'_c$

$$Sc = Cr \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{p'_1}{p'_0} + Cc \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{p'_1}{p'_c} \quad (51)$$

$$Cc = \frac{\Delta e}{\Delta \log p'} ; \text{ pada kurva penambahan beban atau pada } p' > P'_c$$

$$Cr = \frac{\Delta e}{\Delta \log p'} ; \text{ pada kurva penambahan beban atau pada } p' < P'_c$$

Dengan:

C_r = indeks pemampatan kembali

C_c = indeks pemampatan

H = tebal lapisan tanah

P'_c = tekanan prakonsolidasi

e_0 = angka pori awal

Δ_p = tambahan tegangan akibat beban fondasi

$p_{o'}$ = tekanan *overburden* efektif mula-mula sebelum dibebani

Untuk perhitungan waktu konsolidasi yang terjadi, maka rumus yang digunakan dapat dilihat Persamaan 52.

$$T = \frac{T_v \times H^2}{C_v} \quad (52)$$

Dengan :

T = waktu penurunan

H = tebal lapisan

C_v = koefisien konsolidasi

T_v = factor waktu (*time factor*)

3.5 Geotekstil

Geotekstil adalah salah satu jenis geosintetik atau produk buatan dari polimer yang berfungsi untuk memperbaiki kinerja pada tanah. Dalam proses pembuatan geotekstil, elemen tekstil seperti serat-serat atau beberapa untai serat dikombinasikan menjadi struktur tekstil lembaran. Jenis geotekstil kemudian dibagi berdasarkan metode yang digunakan untuk mengkombinasikan filamen atau pita menjadi struktur lembaran. Jenis geotekstil yang utama adalah tak-teranyam dan teranyam.

3.5.1 Geotekstil Teranyam (*Woven Geotextile*)

Geotekstil teranyam adalah salah satu jenis geotekstil yang berbentuk anyaman, biasanya dua arah atas dan bawah. Geotekstil teranyam terbuat dari *silt film tape polypropy*. Geotekstil teranyam memberikan kuat tarik maksimal pada

berat tahan minimal. Hal ini dapat memberikan keuntungan ekonomis yang besar untuk mendapatkan tingkat keamanan struktur yang diharapkan.

Geotekstil teranyam tidak akan mudah koyak atau robek pada saat dipasang di lapangan. Struktur anyaman yang kekar (*double twist*) dari *Geotextile Woven* menjamin kekuatan tekanan hingga mencapai 40 kN/m saat digunakan sebagai separator atau lapisan pemisah. Karena jika material pemisah ini sudah koyak pada saat pemasangan, maka fungsi separator akan terganggu.

Bentuk permukaan dari Geotekstil teranyam yang sangat unik memberikan koefisien geser (*pull out resistance*) besar ketika dipasang pada tanah kohesif. Hal ini dapat berpengaruh terhadap panjang penjangkaran yang diperlukan untuk aplikasi perkuatan. Semakin kasar permukaan, maka panjang penjangkaran semakin pendek demikian juga sebaliknya.

Geotekstil teranyam adalah material yang berbentuk lembaran dan terbuat dari serat atau benang *polymer* yang berbahan dasar *polypropylene* atau *polyester* yang dianyam menggunakan mesin modern yang berteknologi tinggi. Geotekstil teranyam bersifat permeable dan memiliki kuat tarik yang tinggi. Geotekstil teranyam, mempunyai kuat tarik lebih tinggi dibandingkan dengan geotekstil tak teranyam.

Fungsi dari material ini sendiri yaitu diaplikasikan sebagai material stabilisasi (*stabiliator*) untuk tanah dasar, khususnya pada tanah lunak. Selain itu dapat juga diaplikasikan pada jalur rel kereta api, pada lahan yang akan ditimbun atau reklamasi, pada pembuatan atau konstruksi jalan, dan lain sebagainya. Adapun gambar geotekstil teranyam (*woven*) dapat dilihat pada Gambar 3.18 berikut ini.



Gambar 3.18 Geotekstil Teranyam (*Woven Geotextile*)

3.5.2 Geotekstil Tak Teranyam (*Non Woven Geotextile*)

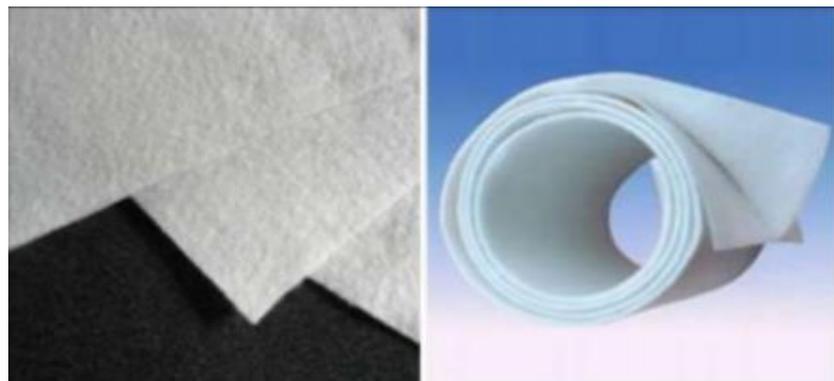
Geotekstil tak teranyam adalah salah satu jenis geotekstil yang terbuat dari bahan *polypropylene* dan *polyester*. Bentuk *geotextile non woven* tidak teranyam seperti karpet kain. Geotekstil tak teranyam dirancang untuk dapat memberikan kinerja yang optimal per satuan berat. Ketahanan mekanik dan hidrolis yang sangat baik menjadikan Geotekstil tak teranyam sebagai pilihan yang tepat untuk lapisan pemisah dan penyaring. karena memiliki kekuatan jebol (*puncture resistance*) yang tinggi untuk menjamin material tidak rusak pada saat pelaksanaan.

Geotekstil tak teranyam memiliki bukaan pori yang relatif kecil namun memiliki permeabilitas yang tinggi. Hal ini dapat berfungsi sebagai penahan butiran tanah yang baik, namun tetap memungkinkan aliran air tidak terganggu, Kriteria ini sangat penting saat diaplikasikan untuk drainasi yang menuntut tidak terjadinya penyumbatan (*clogging*) pada media drainasinya karena akumulasi lolosnya butiran tanah dalam jumlah besar. Demikian juga pada saat diaplikasikan pada konstruksi filter di bawah riprap. Geotekstil tak teranyam dengan baik menahan butiran tanah atau pasir, namun memungkinkan aliran air sama sekali tidak terganggu, sehingga tidak akan terjadi peningkatan tekanan

hidrostatik dan hidrodinamis air yang mengganggu stabilitas timbunan. Geotekstil tak teranyam memiliki beberapa fungsi sebagai berikut :

1. sebagai lapisan proteksi geomembrane
2. sebagai pemisah dan lapisan perkuatan di bagian bawah jalan raya baru, area parker, unit industri, dan lain-lain.
3. sebagai separator untuk mencegah pencampuran atau intermixing antara lapisan tanah yang berbeda
4. sebagai filter pada saluran drainase

Adapun gambar geotekstil tak teranyam (*non woven*) dapat dilihat pada Gambar 3.19 berikut ini.



Gambar 3.19 Geotekstil Tak Teranyam (*Non Woven Geotextile*)

3.6 Plaxis

3.6.1 Pendahuluan

Plaxis merupakan suatu program aplikasi komputer berdasarkan metode elemen hingga dua dimensi yang digunakan secara khusus untuk dapat menganalisis deformasi dan stabilitas untuk berbagai aplikasi dalam bidang geoteknik, seperti daya dukung tanah. Kondisi sesungguhnya dapat dimodelkan dalam regangan bidang (*plane-strain*) maupun secara *axisymmetric*. Plaxis menerapkan model antarmuka grafis yang mudah digunakan sehingga pengguna dapat membuat model geometri dan jaring elemen dengan cepat berdasarkan penampang melintang dari kondisi yang ingin dianalisis. Plaxis terdiri dari empat buah sub-program yaitu masukan, perhitungan, keluaran, dan kurva.

Plane-strane digunakan untuk menganalisis struktur yang memiliki potongan melintang dengan pembebanan dan kondisi tegangan yang seragam dan perpindahan atau deformasi pada arah ini dianggap nol. Sedangkan *axisymmeetric* digunakan untuk menganalisis struktur lingkaran (*circular structures*) yang memiliki potongan radial dan pembebanan seragam terhadap pusat, dengan deformasi dan tegangan yang dianggap sama pada arah radialnya.

Kondisi di lapangan yang disimulasikan ke dalam program Plaxis ini bertujuan untuk mengimplementasikan tahapan pelaksanaan di lapangan ke dalam tahapan pengerjaan pada program, dengan harapan pelaksanaan di lapangan dapat mendekati sedekat mungkin pada program, sehingga respon yang dapat dihasilkan dari program dapat diasumsikan sebagai cerminan dari kondisi yang sebenarnya sebagaimana di lapangan.

3.6.2 Perhitungan dengan program Plaxis

Pemodelan *finite element* dengan aplikasi program Plaxis dipergunakan untuk melakukan perhitungan deformasi selama konstruksi pada timbunan di atas tanah lunak. Langkah-langkah perhitungan sebagai berikut.

1. Memodelkan geometri tanah
2. Memberikan kondisi batas (*boundary condition*) terhadap lapisan tanah gunakan *standard fixiities*. Maksud dari *standard fixities* adalah sebagai berikut.
 - a. Batas kiri dan kanan bersifat *horizontally fixed*, artinya pada bagian ini lapisan tanah tidak mengalami *displacement* arah horizontal tetapi untuk arah vertikal saja.
 - b. Batas bawah bersifat *horizontally fixed* dan *vertically fixed*, artinya pada bagian ini tanah tidak mengalami deformasi vertikal maupun horizontal.
 - c. Batas atas bersifat *free*, artinya pada bagian ini dapat mengalami deformasi vertikal maupun horizontal.

3. Membentuk mesh lapisan tanah dan timbunan (*mesh generation*). *Mesh generated* merupakan pembagian struktur menjadi elemen-elemen *cluster* dan titik-titik nodal elemen (*nodes*). Kegunaan *mesh* ini adalah untuk melakukan perhitungan dalam metode elemen hingga.
4. Menentukan kondisi air tanah (*groundwater condition*).
5. Menentukan konfigurasi awal dari mesh (*initial mesh generation*), karena konstruksi timbunan merupakan beban yang dilakukan bertahap maka konfigurasi awal dari mesh perlu dispesifikasikan dahulu atau mesh untuk timbunan tidak diaktifkan dahulu.
6. Menghitung tegangan-tegangan awal (*initial stress*). Tegangan efektif dan tekanan air pori pada kondisi awal dihitung dahulu.
7. Menspesifikasikan titik yang ditinjau. Hal ini dilakukan untuk mengetahui besarnya deformasi dan tekanan air pori yang terjadi.
8. Melakukan perhitungan.