

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah

Tanah (Braja M. Das, 1988) diartikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral–mineral padat yang tidak 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 di antara partikel–partikel padat tersebut. Tanah memiliki fungsi sebagai pendukung pondasi dari bangunan sehingga diperlukan tanah dengan kondisi kuat sehingga mampu menahan beban yang bekerja di atas tanah tersebut. Dalam arti lain tanah (Craig, 1991) didefinisikan sebagai akumulasi partikel mineral atau ikatan antar partikelnya, yang terbentuk akibat pelapukan dari batuan.

Terbentuknya tanah berawal dari proses pelapukan batuan. Pada proses pelapukan batuan membutuhkan waktu yang lama, dimana setiap proses pelapukan pada umumnya dipengaruhi oleh cuaca sehingga batuan yang telah mengalami pelapukan akan berubah menjadi tanah. Secara umum proses pelapukan batuan dibagi menjadi tiga jenis yaitu pelapukan fisik, pelapukan kimiawi dan pelapukan biologi.

1. Pelapukan fisik, merupakan proses mekanik yang menyebabkan batuan masif menjadi pecah dan hancur serta terfragmentasi menjadi partikel–partikel mikro tanpa ada perubahan yang bersifat kimia. Proses pelapukan fisik dapat terjadi akibat perubahan suhu secara drastis, hantaman air hujan yang deras maupun ringan dan erosi.
2. Pelapukan kimiawi, merupakan proses pelapukan yang diikuti dengan terjadinya perubahan pada sifat kimia batuan tersebut. proses pelapukan kimiawi dapat terjadi akibat pelarutan atau solubilitas, hidrasi atau proses pengikatan pada molekul air sehingga volume akan meningkat dan

kekuatan akan melemah serta akan menjadi mudah mengalami proses pelapukan.

3. Pelapukan biologi atau organik, merupakan pelapukan yang terjadi akibat adanya peranan makhluk hidup atau aktivitas kehidupan. Seperti tumbuhnya akar tanaman, mikroorganisme tanah dan binatang.

2.2 Klasifikasi Tanah

Tanah (Bowles, 1989) adalah campuran partikel-partikel yang terdiri dari salah satu atau seluruh jenis berikut:

1. Berangkal (*boulders*), merupakan bongkahan batu yang besar, biasanya berkisar antara 250 mm sampai 300 mm. bongkahan batu dengan ukuran 150 mm sampai 250 mm, fragmen batuan ini disebut kerakal (*cobbles*).
2. Kerikil (*gravel*), partikel batuan dengan ukuran 5 mm sampai 150 mm. Kerikil terdiri dari pecahan-pecahan batu dan terdiri dari satu macam zat mineral tertentu, misalnya kwarsa atau *flint*.
3. Pasir (*sand*), partikel batuan dengan ukuran berkisar antara 0,074 mm sampai 5 mm, dari kasar (3-5 mm) sampai halus (kurang dari 1 mm). butiran pasir terdiri dari satu macam zat mineral terutama kwarsa.
4. Lanau (*silt*), partikel yang merupakan peralihan antara lempung dan pasir halus. Memiliki ukuran 0,002 mm sampai 0,074 mm. Ukuran partikel tersebut menjadikan sifat tanah ini kurang plastis dan lebih mudah ditembus air daripada lempung. Selain itu, lanau menunjukkan sifat dilatasi yang tidak terdapat pada lempung.
5. Lempung (*clay*), partikel mineral dengan ukuran lebih kecil dari 0,002 mm. memiliki sifat plastisitas dan kohesif. Kohesif menunjukkan kenyataan bahwa partikel memiliki gaya tarik menarik atau melekat antara satu dengan yang lainnya. Sedangkan plastisitas menunjukkan sifat yang memungkinkan bentuk bahan itu berubah tanpa perubahan isi atau tanpa kembali ke bentuk asalnya tanpa terjadi keretakan atau pecah.

6. Koloid (*colloids*), partikel mineral dengan ukuran lebih kecil dari 0,001 mm. Sehingga dapat diartikan bahwa koloid merupakan tanah yang sangat halus.

Berdasarkan ukuran butiran dari klasifikasi AASHTO dan USCS dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1 Tabel Ukuran Butiran Tanah Berdasarkan AASHTO dan USCS

Sistem Klasifikasi	Ukuran Butiran (mm)			
	Kerikil	Pasir	Lanau	lempung
AASHTO	76,2 - 2	2 - 0,075	0,075 - 0,002	< 0,002
USCS	76,2 - 4,75	4,75 - 0,075	< 0,075	

Sumber: Braja M. Das, 2000.

2.3 Tanah Dasar (*Subgrade*)

Tanah dasar (*subgrade*) adalah bagian terpenting dari konstruksi jalan, karena tanah dasar inilah yang mendukung seluruh konstruksi jalan beserta muatan lalu lintas di atasnya. Tanah dasar berperan penting dalam menentukan mahal atau tidaknya pembangunan jalan, karena tanah dasar menentukan tebal lapisan perkerasan, yang berarti menentukan mahal atau murah biaya pembangunan jalan tersebut (Soedarsono, DU, 1985).

2.4 Lereng

Lereng (*slope*) merupakan bagian dari bentang alam yang memiliki sudut miring dan beda ketinggian pada tempat tertentu, sehingga disimpulkan bahwa dari sudut (kemiringan) lereng merupakan suatu variabel beda tinggi antara dua tempat yang dibandingkan dengan daerah yang relatif lebih rata atau datar. Lereng dapat terjadi secara ilmiah atau dibentuk oleh manusia.

Apabila suatu permukaan membentuk suatu kemiringan maka komponen massa tanah di atas bidang gelincir akan cenderung bergerak ke arah bawah akibat adanya gaya gravitasi. Jika gaya berat yang terjadi cukup besar, dapat mengakibatkan lereng mengalami kelongsoran. Menurut SNI 8460:2017, lereng

terbagi menjadi beberapa jenis, antara lain lereng alam dan lereng buatan (lereng galian dan lereng timbunan).

2.4.1 Lereng Alam

Terjadinya lereng alam diakibatkan oleh kegiatan alam (erosi, gerakan tektonik, dan lainnya). Material yang membentuk lereng memiliki kecenderungan tergelincir akibat beratnya sendiri serta gaya-gaya luar yang ditahan oleh kuat geser tanah dari material tersebut. Gangguan kestabilan akan terjadi apabila tahanan geser tanah tidak dapat mengimbangi gaya-gaya yang menyebabkan gelincir pada bidang longsor. Lereng alam yang stabil selama bertahun-tahun dapat saja mengalami longsor akibat hal-hal seperti dibawah ini:

1. Kenaikan tekanan air pori (akibat naiknya muka air tanah) karena hujan dalam waktu yang lama, pembangunan dan pengisian air waduk, gangguan pada sisten drainase, dan lain sebagainya.
2. Penurunan kuat geser tanah secara progresif akibat deformasi sepanjang bidang yang dapat menimbulkan longsor.
3. Proses pelapukan, akibat dari pelapukan batuan dapat mengalami degradasi.
4. Gempa bumi, efek gempa bumi menyebabkan inersia dalam arah getaran gempa menyebabkan lereng tidak stabil.
5. Gangguan luar yang disebabkan oleh pemotongan atau penimbunan baru.

Aspek penting dari stabilitas lereng alam, antara lain:

1. Kondisi geologi.
2. Kondisi topografi.
3. Kemiringan lereng.
4. Jenis lapisan tanah.
5. Kuat geser tanah.
6. Aliran air dibawah permukaan.
7. Cepat lambatnya pelapukan.
8. Gangguan lalu lintas

Faktor-faktor yang menyebabkan lereng tidak stabil, antara lain:

1. Berkurangnya kekuatan di bagian dasar lereng atau perubahan kemiringan lereng akibat beban tambahan di bagian atas lereng.
2. Tekanan air pori yang meningkat mengakibatkan penurunan tahanan geser pada tanah nonkohesif atau terjadinya pengembangan pada tanah kohesif. Tekanan air tanah dapat meningkat ketika tanah mengalami kondisi jenuh akibat air hujan, rembesan, atau munculnya air permukaan.
3. Kuat geser tanah atau batuan yang menurun akibat adanya pelapukan, perubahan mineralogi dan adanya rekahan.
4. Gempa bumi yang menimbulkan getaran, peledakan atau pemancangan tiang.

2.4.2 Lereng Galian

Terbentuknya lereng galian akibat kegiatan penggalian atau pemotongan pada tanah asli. Perancangan pemotongan lereng galian yang dimaksud adalah usaha untuk membuat suatu lereng dengan kemiringan tertentu yang cukup aman dan ekonomis. Stabilitas pemotongan ditentukan oleh kondisi geologi, sifat teknis tanah, tekanan air akibat rembesan serta cara pemotongan.

Aspek penting dari stabilitas lereng galian, yaitu:

1. Kuat geser di bagian galian.
2. Berat isi tanah.
3. Ketinggian Lereng.
4. Kemiringan lereng.
5. Tekanan air pori.

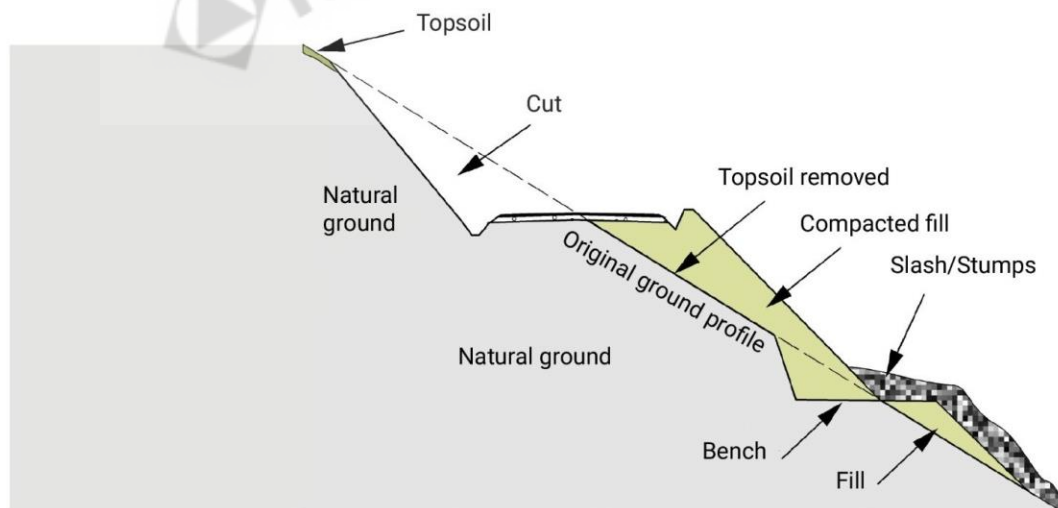
2.4.3 Lereng Timbunan

Lereng timbunan umumnya digunakan untuk badan jalan raya, jalan kereta api, dan bendungan tanah. sifat teknis lereng timbunan dipengaruhi oleh jenis tanah, cara penimbunan dan derajat kepadatan tanah. Analisis secara terpisah harus dilakukan pada lereng timbunan, yaitu pada kondisi jangka pendek (*short*

term) atau ketika penimbunan selesai), kondisi jangka panjang (*long term*) dan gangguan gempa. Adapun sketsa lereng timbunan dapat dilihat pada **Gambar 2.1**.

Faktor-faktor yang menyebabkan ketidakstabilan lereng timbunan, antara lain:

1. Terjadinya *overstressing* pada fondasi timbunan tanah kohesif setelah masa konstruksi.
2. Umumnya pada lereng timbunan, stabilitas jangka pendek pada tanah kohesif lunak lebih penting daripada stabilitas jangka panjang, karena fondasi timbunan mendapatkan kekuatan yang merupakan hasil disipasi air pori. Perlu dilakukan pemeriksaan stabilitas pada beberapa kondisi tekanan air pori.
3. Penurunan muka air cepat dan erosi buluh. Pada timbunan bendungan, penurunan muka air cepat menyebabkan ketidakstabilan pada tereng timbunan. Penyebab lainnya adalah erosi bawah permukaan atau erosi buluh.
4. Gaya-gaya dinamis. getaran dapat dipicu gempa bumi, peledakan, pemancangan tiang dan sebagainya.



Sumber: NZ Forest Road Engineering Manual

Gambar 2.1 Tmbunan Badan Jalan pada Tanah Dasar Berbentuk Lereng

2.5 Galian dan Timbunan

Berdasarkan Pedoman Perencanaan Timbunan Jalan Pendekat Jembatan Pd T-11-2003 (Departemen Kimpraswil, 2003), galian konstruksi merupakan galian yang dilakukan untuk memenuhi spesifikasi pekerjaan konstruksi, yaitu sebagai lantai pondasi jalan dan jembatan, gorong-gorong, dinding penahan tanah atau bangunan konstruksi yang lain. Timbunan konstruksi merupakan material pengisi ruang galian (di sekeliling pondasi, turap, dan bangunan konstruksi lainnya) yang diisi secara bertahap dengan tebal $\pm 20\text{-}30$ cm.

Timbunan didefinisikan sebagai material tanah yang ditempatkan pada suatu lokasi dan dipadatkan dengan tujuan meningkatkan kualitas perkerasan jalan di atas permukaan tanah dasar/eksisting (*Federal Highway Administration*, 2012). Untuk meningkatkan stabilitas timbunan yang berada di atas tanah dasar berbentuk lereng, maka timbunan perlu dilakukan perkuatan, salah satu perkuatannya adalah dengan *rock fill*.

Dalam pelaksanaan konstruksi timbunan, elevasi timbunan harus diperhatikan, pelaksanaannya dilakukan secara bertahap dengan maksud menghindari kegagalan konstruksi berupa amblasnya timbunan. Pada setiap penambahan timbunan akan bertambahnya tegangan efektif, dengan meningkatnya tegangan efektif maka daya dukung tanah tersebut juga akan meningkat.

Analisa terhadap lereng timbunan diperlukan untuk memprediksi stabilitas dari konstruksi timbunan tersebut, yaitu membandingkan tegangan geser yang terbentuk sepanjang permukaan longsor yang paling mungkin terhadap kuat geser yang dimiliki oleh tanah yang biasanya dinyatakan dalam faktor keamanan (*safety factor*). Gaya-gaya yang berpotensi menyebabkan keruntuhan pada timbunan dapat mengakibatkan pergeseran tanah (*displacement*).

2.6 *Rock Fill*

Kondisi tanah dasar pada proyek pembangunan Jalan Tol Problinggo – Banyuwangi seksi 2 umumnya merupakan tanah keras, sehingga sering dijumpai area galian yang merupakan material batu. Galian batu atau bongkahan batu (*Rock Fill*) tersebut dimanfaatkan sebagai material tambahan pada timbunan. Pada pelaksanaannya di lapangan, material *Rock fill* ditempatkan pada dasar timbunan dengan diameter bongkahan sampai dengan 300 mm. Bongkahan batu tersebut memiliki kekuatan yang cukup tinggi sehingga baik digunakan untuk stabilisasi timbunan.



Sumber: SpringerLink

Gambar 2.2 Pekerjaan Timbunan Badan Jalan Dengan *Rock Fill*

2.7 Konsep Stabilitas

Stabilisasi tanah pada prinsipnya adalah memperbaiki mutu tanah yang kurang baik. Menurut bowles (1986) apabila suatu tanah yang terdapat di lapangan bersifat sangat lepas atau mudah tertekan, atau mempunyai indeks konsistensi yang tidak sesuai, permeabilitas terlalu tinggi atau sifat lain yang tidak diinginkan sehingga tidak sesuai untuk suatu proyek pembangunan, maka tanah tersebut harus dilakukan stabilisasi.

2.7.1 Teori Mohr Coulumb

Timbunan mempunyai tendensi untuk runtuh didasari oleh tegangan geser pada tanah. Tegangan geser tersebut dapat berasal dari gravitasi, ataupun gaya-gaya lain seperti aliran air, tektonik dan aktifitas seismik. hal tersebut ditunjukkan berdasarkan Teori Mohr-Coulomb.

Mohr (1980) memperkenalkan sebuah teori tentang keruntuhan pada material yang menyatakan bahwa keruntuhan terjadi pada suatu material akibat kombinasi kritis antara tegangan geser dan tegangan normal, bukan hanya akibat tegangan geser dan tegangan normal dalam kondisi maksimum saja, kriteria ini dapat dirumuskan menjadi:

$$\tau = f(\sigma) \dots \dots \dots (2.1)$$

Coulomb (1776) mendefinisikan fungsi $f(\sigma)$ sebagai:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \dots \dots \dots (2.2)$$

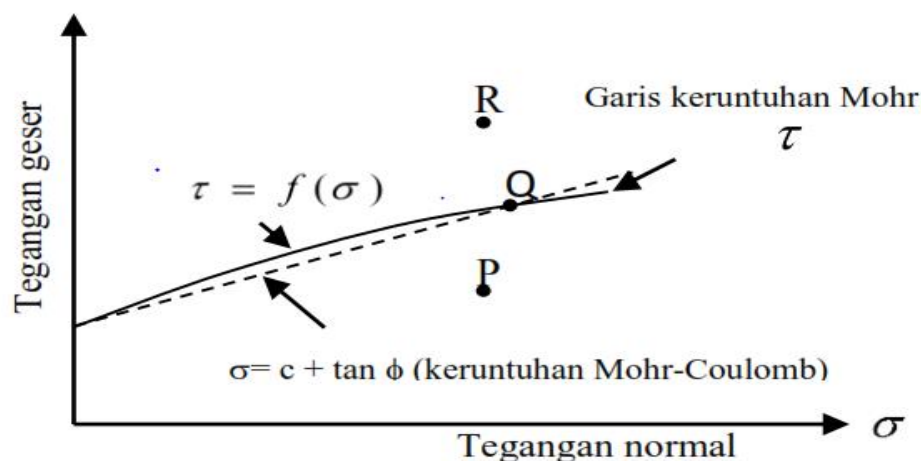
Dengan:

τ = Tegangan geser (kN/m^2)

c = Kohesi (kN/m^2)

σ = Tegangan normal (kN/m^2)

$\tan \phi$ = Koefisien geser dalam batuan



Sumber: Hardiyatmo, 2002

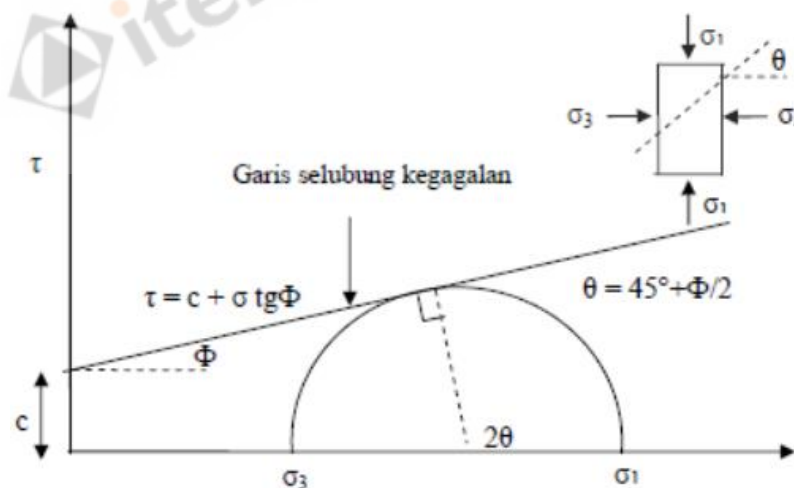
Gambar 2.3 Kriteria Mohr: $\tau = f(\sigma)$.

Bila tegangan normal dan geser pada sebuah bidang dalam suatu massa tanah seperti pada **Gambar 2.3**, maka jika kedudukan tegangan-tegangan baru mencapai titik P, keruntuhan akibat geser tidak akan terjadi. Keruntuhan geser terjadi jika tegangan mencapai titik Q yang terletak pada garis keruntuhan dan kedudukan tegangan yang ditunjukkan oleh titik R tidak akan pernah terjadi karena telah mengalami keruntuhan sebelum mencapai titik R. Lingkaran Mohr atau Mohr *Cicle* berbentuk lingkaran tegangan, dengan koordinat-koordinat τ dan σ ditunjukkan pada **Gambar 2.4**. Persamaan tegangan geser dan tegangan normal yang terjadi pada bidang geser pada saat kegagalan, dinyatakan sebagai berikut:

$$\tau_f = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) \sin 2\theta \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\sigma_f = \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) \cos 2\theta \dots\dots\dots(2.4)$$

$$\theta = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \dots\dots\dots(2.5)$$



Sumber: Hardiyatmo, 2002

Gambar 2.4 Lingkaran Mohr

Gambar 2.4 menunjukkan hubungan antara tegangan utama efektif saat keruntuhan dan parameter kuat geser juga dapat diperoleh. Besarnya nilai parameter kuat geser dapat ditentukan dari persamaan berikut:

$$\sin \phi = \frac{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)}{c \cot \phi + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = 2c \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi \dots\dots\dots(2.7)$$

2.7.2 *Shear Strength Reduction Method*

Metode ini sering juga disebut sebagai *phi – c reduction method* atau *initial stress method* yang didefinisikan suatu metode yang digunakan untuk menentukan nilai factor keamanan (*safety factor*) dan umumnya pada pendekatan-pendekatan elemen hingga. Metode ini menentukan nilai factor keamanan sebagai:

$$SF = \frac{c}{c_{\text{reduksi}}} = \frac{\tan \phi}{\tan(\phi_{\text{reduksi}})} \dots\dots\dots(2.8)$$

Pendekatan yang utama dari elemen hingga adalah:

$$s = D \cdot e$$

Dimana:

$s = stress$.

$D = \text{matriks kekakuan / stiffness matri.}$

$e = strains / \text{regangan.}$

Dengan c atau ϕ (*shear strength*) tanah yang direduksi akan mempengaruhi input dan output dari matriks-matriks tersebut sehingga dengan suatu pendekatan tertentu akan menghasilkan suatu nilai factor keamanan (*safety factor*) yang akan konvergen pada suatu batasan tertentu (galat / jumlah iterasi *max*). Nilai factor keamanan (*safety factor*) yang dihasilkan akan berhubungan dengan berbagai macam variable (*steps / langkah iterasi, time, displacement, water pressure*, dan sebagainya).

Adapun kelebihan dari *shear strength reduction method*, antara lain:

1. Dapat diterapkan pada kondisi geometri yang berubah-ubah (mencakup *stage of construction*) atau dapat mensimulasikan sebagai *stress-path* dari suatu material tanah.
2. Dapat menghasilkan nilai *displacement*.
3. Dapat menghasilkan hubungan antara factor keamanan (*safety factor*) dengan waktu (*time*), step iterasi, *water pressure*, *loads increment*, dan lain sebagainya.
4. Metode ini cocok digunakan untuk pendekatan elemen hingga (*finite element*)

2.8 Model Material Mohr-Coulomb pada PLAXIS 2D

Tanah cenderung berperilaku sangat tidak linear ketika menerima beban, perilaku tegangan-tegangan yang non linear ini dapat dimodelkan dalam beberapa tingkat pemodelan. Model Mohr Coulumb yang telah dikenal luas merupakan model pendekatan orde pertama dari perilaku tanah yang sesungguhnya. model ini memerlukan beberapa parameter tanah, yaitu:

2.8.1 Sudut Geser Dalam (ϕ)

Kuat geser tanah merupakan gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Parameter kuat geser tanah diperlukan untuk analisis-analisis kapasitas daya dukung tanah, stabilitas lereng dan gaya dorong pada dinding penahan tanah (Hardiyatmo, 2002). Sudut geser dalam terbentuk dari hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser di dalam material tanah atau batuan. Hubungan antara sudut geser dalam dan jenis tanah disajikan pada **Tabel 2.2**.

Tabel 2.2 Hubungan Antara Sudut Geser Dalam dengan Jenis Tanah

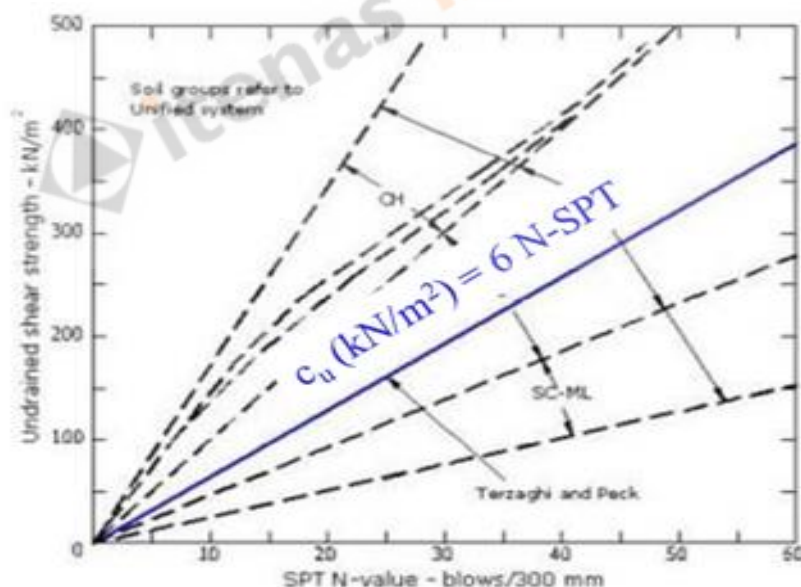
Tipe Tanah	θ (deg)
<i>Pasir : butiran bulat</i>	
Renggang/lepas	27-30
Menengah	30-35
Padat	35-38

<i>Pasir : butiran bersudut</i>	
Renggang/lepas	30-35
Menengah	35-40
Padat	40-45
<i>Kerikil bercampur pasir</i>	
Lanau	26-35

Sumber: Braja M. Das, Principles of Geotechnical Engineering

2.8.2 Kohesi

Kohesi adalah gaya tarik menarik antara partikel tanah. Kohesi merupakan parameter kuat geser tanah yang berupa getaran lateral tanah sehingga menentukan ketahanan tanah terhadap deformasi akibat tegangan yang bekerja pada tanah. Deformasi terjadi akibat kombinasi keadaan kritis pada tegangan normal dan tegangan geser yang tidak sesuai dengan faktor keamanan (*safety factor*) yang direncanakan. Nilai kohesi dapat diperoleh dari pengujian Triaxial dan *Direct Shear*. Nilai kohesi dapat ditentukan berdasarkan hasil pengujian SPT dengan korelasi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.



Sumber: Modifikasi dari Terzaghi dan Peck, 1987

Gambar 2.5 Korelasi *Undrained Shear Strength* terhadap N-SPT

2.8.3 Modulus Young (E)

Modulus elastisitas atau sering disebut juga *young modulus* merupakan perbandingan antara tegangan dan regangan. Semakin kecil modulus elastisitas

suatu tanah, maka akan semakin mudah bagi tanah tersebut mengalami perpendekan atau perpanjangan. Sehingga modulus elastisitas tanah mempengaruhi kekakuan tanah. Nilai modulus elastisitas (E_s) secara empiris dapat ditentukan dari jenis tanah seperti pada **Tabel 2.3**.

Tabel 2.3 Nilai Rentang Modulus Elastisitas Tanah

Soil Type	Es	
	ksf	Mpa
Clay		
Very Soft	50 – 250	2 – 15
Soft	100 – 500	5 – 25
Medium	300 – 1000	15 – 50
Hard	1000 – 2000	50 – 100
Sandy	500 – 5000	25 – 250
Glacial till		
Loose	200 – 3200	10 – 153
Dense	3000 – 15000	144 – 720
Very dense	10000 – 30000	478 – 1440
Loess	300 – 1200	14 – 57
Sand		
Silty	150 – 450	7 – 21
Loose	200 – 500	10 – 24
Dense	1000 – 1700	48 – 81
Sand & gravel		
Loose	1000 – 3000	48 – 144
Dense	2000 – 4000	96 – 192
Shale	3000 – 3000000	144 – 14400
Silt	40 – 400	2 – 20

Sumber: bowloes, 1996

2.8.4 Poisson Ratio

Angka poisson (μ) ditentukan sebagai ratio kompresi poros terhadap regangan pemuaian lateral. Angka Poisson digunakan pada kajian tekanan dan penurunan ditentukan dari perbandingan antara regangan longitudinal (ϵ_v) dan regangan lateral (ϵ_l) ketika digunakan tegangan uniaxial, atau:

$$\mu = \frac{\epsilon_v}{\epsilon_l}$$

Nilai *Poisson Ratio* dapat ditentukan berdasarkan jenis tanah seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 2.4**.

Tabel 2.4 Hubungan Antara Jenis Tanah dan *Poisson Ratio*

Type of Soil	μ
Clay saturated	0,4 – 0,5
Clay unsaturated	0,1 – 0,3
Sandy clay	0,2 – 0,3
Silt	0,3 – 0,35
Sand (dense)	0,2 – 0,4
Coarse (void ratio = 0,4 – 0,7)	0,15
Fined – grained (void ratio = 0,4 – 0,7)	0,25
Rock	0,1 – 0,4 (depends somewhat on type of rock)
Loess	0,1 – 0,3
Ice	0,36
Conerate	0,15

Sumber: Buku mekanika tanah, Braja M. Das, Jilid 1

2.8.5 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 granular bergantung pada kepadatan dan sudut gesernya. Untuk pasir kwarsa nilai dari dilatasi kurang lebih adalah $\psi \approx \phi - 30^\circ$. Walaupun demikian, dalam beberapa kasus sudut dilatasi adalah nol untuk nilai ϕ kurang dari 30° . Nilai negatif yang kecil untuk ψ realistis hanya untuk tanah pasir yang sangat lepas.

2.8.6 Formulasi Model Mohr-Coulomb

Kondisi lelah Mohr-Coulomb merupakan muai hukum friksi dari Coulomb ke kondisi tegangan secara umum. Faktanya, kondisi ini memastikan bahwa hukum friksi Coulomb diterapkan dalam tiap bidang di dalam elemen. Kondisi lelah Mohr-Coulomb secara penuh terdiri dari enam buah fungsi lelah saat diformulasikan dalam konteks tegangan utama:

$$f_{1a} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) \cdot \sin\phi - c \cdot \cos\phi \leq 0$$

$$f_{1b} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) \cdot \sin\phi - c \cdot \cos\phi \leq 0$$

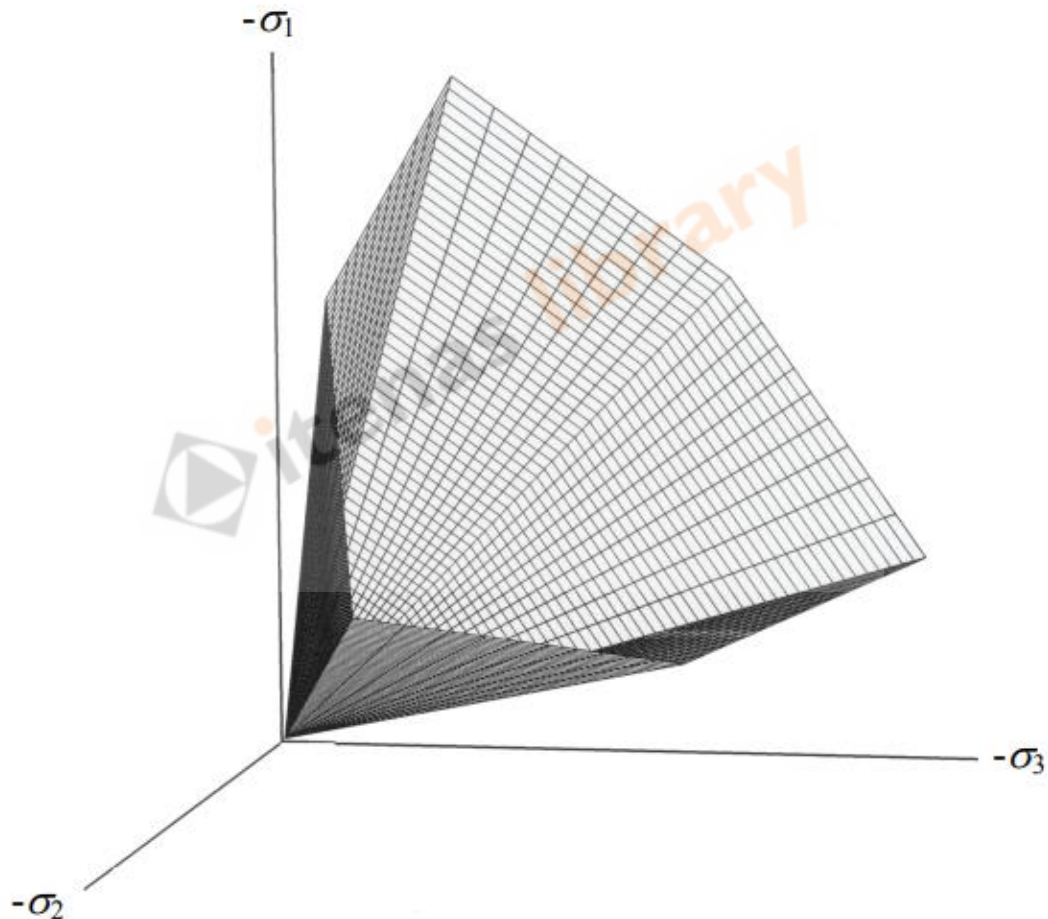
$$f_{2a} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) \cdot \sin\phi - c \cdot \cos\phi \leq 0$$

$$f_{2b} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) \cdot \sin\phi - c \cdot \cos\phi \leq 0$$

$$f_{3a} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) \cdot \sin\phi - c \cdot \cos\phi \leq 0$$

$$f_{3b} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) \cdot \sin\phi - c \cdot \cos\phi \leq 0$$

Dua buah parameter dari model plastis yang muncul dalam fungsi lelah merupakan sudut geser ϕ dan kohesi c yang telah dikenal luas. Fungsi-fungsi lelah ini secara bersamaan membentuk konus heksagonal dalam ruang tegangan utama seperti pada **Gambar 2.6**.



Sumber: PLAXIS Manuals

Gambar 2.6 Bidang Lelah Mohr-Coulomb dalam Ruang Tegangan Utama ($c=0$)

Selain fungsi lelah, didefinisikan enam buah potensi plastis untuk model Mohr-Coulomb:

$$g_{1a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_3) \cdot \sin \psi$$

$$g_{1a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_2) \cdot \sin \psi$$

$$g_{1a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_1) \cdot \sin \psi$$

$$g_{1a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_3) \cdot \sin \psi$$

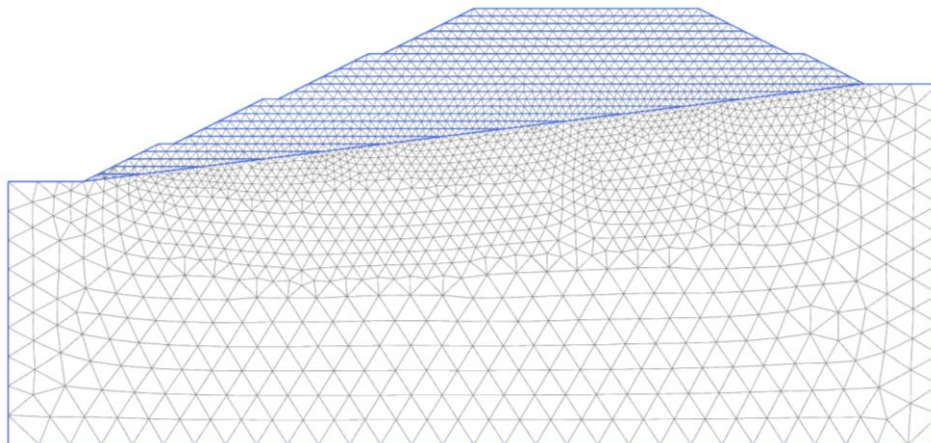
$$g_{1a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_2) \cdot \sin \psi$$

$$g_{1a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_1) \cdot \sin \psi$$

Fungsi potensi plastis mempunyai parameter plastisitas ketiga, yaitu sudut dilatasi ψ . Parameter ini dibutuhkan untuk memodelkan peningkatan regangan volumetrik plastis positif (dilatasi) seperti secara aktual terjadi pada tanah yang padat.

2.9 Metode Elemen Hingga PLAXIS 2D

Metode elemen hingga adalah prosedur perhitungan yang dipakai untuk mendapatkan pendekatan dari permasalahan matematis yang sering muncul dalam rekayasa teknik. Metode tersebut membuat persamaan matematis dengan berbagai pendekatan dan rangkaian persamaan aljabar yang melibatkan nilai-nilai pada titik-titik kritis pada bagian yang dievaluasi. FEM (*Finite Element Method*) pada dasarnya membagi kumpulan tanah menjadi jaring-jaring elemen yang disebut elemen hingga (*finite element*) seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.7**.



Sumber: PLAXIS 2D

Gambar 2.7 Contoh Jaring-Jaring dari *Finite Element* (Elemen Hingga)

PLAXIS (*Finite Element Code For Soil and Rock Analysis*) adalah program pemodelan dan *postprocessing* metode elemen hingga yang melakukan analisa masalah-masalah geoteknik dalam perencanaan sipil. PLAXIS 2D menyediakan berbagai analisa teknik tentang stabilitas, *displacement*, tegangan-tegangan pada tanah, dan lain-lain. prosedur pembuatan model secara grafis yang mudah memungkinkan pembuatan suatu model elemen hingga yang rumit dapat dikerjakan dengan cepat (Brinkgreve 2007).

Program komputer dua dimensi banyak digunakan untuk menganalisis suatu permasalahan geoteknik, salah satunya permasalahan timbunan jalan dengan menggunakan metode elemen hingga atau FEM (*Finite Element Method*) pada program PLAXIS 2D. Kerapatan jaring-jaring elemen pada program PLAXIS 2D dapat diatur pada saat penentuan jenis *mesh*. jenis *mesh* tersebut mempengaruhi kerapatan elemen, hasil analisis serta waktu yang diperlukan untuk analisis. Adapun tahapan analisis timbunan dengan Program PLAXIS antara lain:

1. *Input*

Dalam tahapan ini, timbunan dimodelkan dengan menentukan geometri tanah terlebih dahulu yang berupa kemiringan lereng, tinggi timbunan dan tebal *rock fill* serta material yang akan digunakan, dalam kasus ini material tanah dasar merupakan tanah keras (batuan) dan material timbunan berupa lempung atau pasir.

2. *Mesh Generation*

Penyusunan jarring elemen hingga akan mengikut sertakan seluruh titik dan garis yang ada dalam model geometri yang telah dibuat sebelumnya. Proses penyusunan menggunakan prinsip triangulasi, mencari segitiga yang teroptimasi dan akan menghasilkan jarring elemen yang tidak beraturan (*unstructured mesh*). Pada tahap ini, *mesh* yang digunakan yaitu *very fine*, semakin rapat *mesh* yang digunakan maka hasil analisis akan semakin akurat.

3. *Calculation*

Tahap *calculation* program digunakan apabila proses input geometri, material serta penentuan *mesh generation* telah selesai. Tahap ini akan melakukan analisis berdasarkan geometri, material dan *mesh generation* yang telah diinput serta menentukan tahapan konstruksi di lapangan (*stage construction*).

4. *Output program / Results*

Setelah tahap *calculation* selesai, dapat dilihat hasil analisis pada bagian *output*, dimana bagian tersebut menunjukkan deformasi yang terjadi pada struktur timbunan.

5. *Safety Analysis / Curve*

Faktor keamanan (*safety factor*) dapat diperoleh dari pilihan *Reached Values*. Nilai ΣMsf menunjukkan nilai factor keamanan (*safety factor*). Adapun nilai factor keamanan yang disyaratkan menurut SNI 8640-2017 sebagai berikut:

- a. Untuk kondisi jangka pendek / *Total Stress Analysis* (TSA) dengan nilai faktor keamanan (*safety factor*) ≥ 1.3
- b. Untuk kondisi jangka panjang / *Effective Stress Analysis* (ESA) dengan nilai faktor keamanan (*safety factor*) ≥ 1.5
- c. Untuk kondisi gangguan gempa dengan nilai faktor keamanan (*safety factor*) ≥ 1.1

Curve program pada PLAXIS dapat dipakai untuk menggambarkan kurva hubungan faktor keamanan (*safety factor*) terhadap perpindahan (*displacement*) atau waktu terhadap faktor keamanan (*safety factor*).

2.10 *Total Stress Analysis*

Total stress analysis (TSA) merupakan tinjauan kondisi jangka pendek (*short term*) untuk tanah dalam kondisi *undrained* atau kondisi ketika awal pekerjaan penimbunan sampai selesai dilaksanakan. *Total Stress Analysis* mengabaikan kondisi muka air tanah. Parameter tanah yang digunakan ialah

kohesi (c_u) untuk tanah kohesif dan sudut geser dalam (ϕ) untuk tanah non kohesif.

2.11 *Effective Stress Analysis*

Effective Stress Analysis (ESA) merupakan tinjauan kondisi jangka panjang (*long term*) untuk tanah dalam kondisi *drained*. Kondisi jangka panjang dapat diartikan sebagai kondisi yang akan terjadi setelah pekerjaan penimbunan selesai dilaksanakan. *Effective Stress Analysis* tidak mengabaikan kondisi muka air tanah dan parameter yang digunakan adalah kohesi efektif (c') dan sudut geser dalam efektif (ϕ').

2.12 *Effective Stress Analysis dan Gempa*

Pengujian dalam kondisi ini membutuhkan data parameter tanah berupa kohesi efektif (c') dan sudut geser dalam efektif (ϕ') serta besar percepatan gempa (a) dari hasil perhitungan yang mengacu kepada SNI 8460 tahun 2017. Beban gempa ditambahkan pada analisis jangka panjang (*Effective Stress Analysis*), dikarenakan kecil kemungkinan terjadi gempa pada masa konstruksi (jangka pendek).

2.13 *Kajian Terdahulu*

Kajian terdahulu merupakan penelitian terkait terhadap penelitian yang akan dikaji. Penelitian terdahulu digunakan sebagai bahan acuan dan perbandingan. Adapun kajian terdahulu yang mempunyai relasi atau keterkaitan dan dijadikan perbandingan dengan penelitian ini, antara lain:

1. Kajian Mengenai Pengaruh Tinggi Timbunan Terhadap Kestabilan timbunan

Penelitian oleh Ferra Fahriani (2016) yang berjudul “Analisis Pengaruh Ketinggian Timbunan Terhadap Kestabilan Lereng” bertujuan untuk menganalisis pengaruh nilai faktor keamanan (*safety factor*) terhadap penambahan tinggi timbunan mulai dari 1 meter-5 meter. Metode yang digunakan dalam penelitian ini ialah metode elemen hingga (*Finite Element Method*) dan menggunakan program PLAXIS 2D. Hasil dari kajian ini menunjukkan bahwa ketinggian

timbunan mempengaruhi nilai faktor keamanan, persentase penurunan angka keamanan lereng tiap 1 meter semakin menurun sampai ketinggian 5 meter, dengan persentase penurunan angka keamanan lereng sebesar 2,47% terhadap ketinggian 4 m.

Sama halnya dengan penelitian dalam Tugas Akhir ini, hasil yang diperoleh berupa nilai faktor keamanan dengan kemiringan tanah dasar yang sama terhadap ketinggian timbunan yang bervariasi, diperoleh nilai faktor keamanan semakin menurun ketika ketinggian timbunan bertambah. Pada kemiringan tanah dasar 1V:6H dengan tinggi timbunan lempung (tanpa perkuatan) 5m, 10m, 15m dan 20m diperoleh masing-masing nilai faktor keamanan pada kondisi gempa sebesar 1.085, 0.943, 0.671 dan 0.541.

2. Kajian Mengenai Pengaruh Kemiringan Lereng Terhadap Kestabilan Timbunan

Penelitian oleh Dadan Ali Sadikin dan Komarudin (2018) yang berjudul “Studi Stabilitas Lereng Timbunan Jalan Terhadap variasi Kemiringan” bertujuan untuk mengetahui nilai faktor keamanan dalam tiap kemiringan lereng timbunan yaitu pada kemiringan 1V:0.5H, 1V:1H, 1V:1.5H, 1V:2H, 1V:2.5H dan 1V:3H. Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) dengan menggunakan program PLAXIS 2D. Hasil yang diperoleh dari kajian ini berupa faktor keamanan dari masing-masing lereng 1V:0.5H, 1V:1H, 1V:1.5H, 1V:2H, 1V:2.5H dan 1V:3H adalah 1.11, 1.42, 1.83, 2.14, 2.51, dan 2.91, sehingga semakin landai kemiringan lereng maka semakin besar faktor keamanannya.

Kajian tersebut memiliki kesamaan dalam penelitian Tugas Akhir ini, hasil yang diperoleh berupa nilai faktor keamanan pada ketinggian timbunan yang sama dengan kemiringan tanah dasar yang divariasikan mengalami penurunan. Dalam analisis stabilitas timbunan lempung tanpa perkuatan dengan tinggi 10 meter terhadap kemiringan tanah dasar 1V:8H, 1V:6H dan 1V:4H diperoleh nilai faktor keamanan masing-masing sebesar 1.027, 0.943 dan 0.574.

3. Kajian Mengenai Pengaruh Beban Gempa Terhadap Kestabilan Timbunan

Garup Lambang Goro (2007) melakukan kajian ulang analisis statik equivalen terhadap analisis dinamik pada konstruksi timbunan dengan judul penelitian “Studi Analisis Stabilitas Lereng pada Timbunan dengan Metode Elemen Hingga”. Penelitian ini menggunakan metode Elemen Hingga dengan bantuan program PLAXIS. Hasil dari penelitian yaitu beban gempa dapat berpengaruh signifikan terhadap tegangan-tegangan dinamik horizontal dan vertikal pada lereng yang menyebabkan menurunnya nilai kestabilan timbunan.

Kajian tersebut memiliki kesamaan dalam penelitian Tugas Akhir ini, dimana dalam penelitian ini menganalisis stabilitas timbunan dalam kondisi jangka pendek, jangka panjang dan gempa. Dari ketiga kondisi tersebut, nilai faktor keamanan terendah selalu berada pada kondisi gempa, hal ini dikarenakan timbunan pada tanah dasar berbentuk lereng rentan terhadap beban dinamis.

