

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Umum**

Pada pelaksanaan timbunan dengan perkuatan terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan diantaranya yaitu parameter tanah timbunan dan tanah yang ditimbun, parameter perkuatan DMC dan geotekstil, serta pertimbangan beban lalu lintas diatas tanah timbunan. Tujuan dari memperhatikan hal tersebut antara lain agar tanah timbunan dapat bekerja dengan maksimal serta menjaga tanah tersebut agar tetap stabil dan tidak mengalami kegagalan.

#### **2.2 Tanah**

Tanah tempat berpijaknya suatu konstruksi baik jalan, jembatan, maupun bangunan merupakan hal utama yang harus diperhatikan karena tidak sedikit kegagalan konstruksi disebabkan oleh tanah itu sendiri seperti tanah yang amblas, atau mengalami penurunan berlebihan dan tidak merata (*different settlement*). Oleh sebab itu sebelum melaksanakan suatu konstruksi penyelidikan tanah merupakan suatu hal yang sangat penting agar dapat mengetahui karakteristik tanah serta metode konstruksi yang baik dan efisien. Menurut beberapa ahli tanah didefinisikan sebagai kumpulan partikel mineral atau biasa disebut agregat yang memiliki ikatan antar partikelnya yang terbentuk dari pelapukan partikel padat disertai gas dan air yang terdapat didalam ruangan antar butir tersebut (Braja M. Das, 1988).

##### **2.2.1 Tanah Lempung**

Lempung (*clays*) merupakan tanah yang sebagian besar terdiri dari partikel mikroskopis atau partikel kecil yang tidak dapat dilihat langsung dengan mata telanjang hingga submikroskopis (tidak dapat dilihat dengan jelas bila hanya dengan mikroskopis biasa) yang berbentuk lempengan pipih dengan ukuran  $\leq 0.002$  mm. Tanah lempung memiliki sifat seperti permeabilitas yang rendah, sangat

kohesif, daya kembang susut yang tinggi. Tanah lempung menjadi sangat keras pada kondisi kering namun bila terkena air pada kadar yang sedang lempung menjadi bersifat plastis dan jika kadar airnya tinggi lempung akan sangat lengket dan lunak (Terzhagi, 1987). Ada beberapa klasifikasi berdasarkan parameter N-SPT, angka pori, kadar air, berat volume kering, dan modulus elastisitas untuk tanah lempung melalui penelitian beberapa ahli seperti pada **Tabel 2.1** dan **Tabel 2.2**.

**Tabel 2.1** Nilai Angka Pori, Kadar Air dan Berat Volume Kering pada Tanah Lempung

Tipe Tanah	Angka Pori, e	Kadar Air (Jenuh)	Berat Volume Kering ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )
Lempung Kaku	0,6	21	17
Lempung Lunak	0,9 – 1,4	30 – 50	11,5 – 14,5
Lempung Organik	2,5 – 3,2	30 – 120	6 – 8

Sumber : Mitchell, 1976

**Tabel 2.2** Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah

Kepadatan	E ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
Sangat Lunak	3 – 30
Lunak	20 – 40
Sedang	45 – 90
Keras	300 – 425

Sumber : Bowles 1997

### 2.2.2 Tanah Lanau

Lanau (*silt*) merupakan tanah peralihan antara lempung dan pasir halus, dengan partikel berukuran dari 0,002 sampai 0,074 mm yang menjadikan sifat tanah ini kurang plastis dan lebih permeable dibanding lempung. selain itu juga lanau memperlihatkan sifat dilatansi yaitu adanya perubahan isi apabila lanau dirubah bentuknya. Beberapa nilai parameter tanah lanau yang didapat dari beberapa ahli dapat dilihat pada **Tabel 2.3**.

**Tabel 2.3** Beberapa Parameter Tanah Lanau Menurut Para Ahli

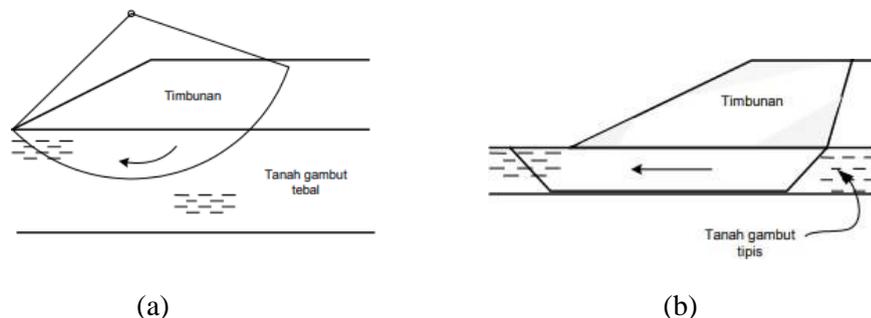
Lanau	E ( $kg/cm^2$ )	20 – 200
	Sudut Geser Tanah Dalam ( $\phi$ )	25 – 30
	Koefisien Permeabilitas (k)	$10^{-4}$ – $10^{-3}$
	Rasio poisson ( $\nu$ )	0.35 – 0.35

Sumber : Braja M Das, Bowles 1997

### 2.3 Timbunan

Timbunan merupakan tanah yang umumnya ditimbun secara bertahap dengan ketinggian tertentu, tujuannya agar lapisan tanah yang lemah tidak tertekan dengan tegangan yang besar sebelum dapat memperbaiki strukturnya sendiri, selain itu timbunan jika tidak ditimbun secara bertahap dapat terjadi kelongsoran pada lerengnya. Sifat teknis dari lereng timbunan dipengaruhi oleh jenis tanah, derajat kepadatan tanah dan cara penimbunan.

Timbunan yang berada di atas tanah lunak memiliki kemungkinan untuk terjadinya gelincir yang disebabkan tekanan air pori maupun tegangan yang berada di atas timbunan itu sendiri. Pada kasus tanah lunak bidang gelincir yang terjadi ada 2 yaitu gelincir lingkaran **Gambar 2.1 (a)** dan gelincir translasi **Gambar 2.1 (b)**. Dengan adanya 2 bidang gelincir tersebut maka diperlukan perhitungan untuk mengetahui kestabilan lereng, mengevaluasi kelongsoran yang terjadi dan menganalisis pengaruh perkuatan yang digunakan.



**Gambar 2.1** Gelincir Lingkaran (a) dan Gelincir Translasi (b).

Sumber : PD T-06-2004-B

## 2.4 Parameter Tanah

Parameter tanah merupakan cara untuk mengetahui sifat dan jenis dari tanah yang dapat dijadikan nilai atau acuan untuk menentukan metode pekerjaan yang lebih efektif dan efisien. Parameter ini dapat diperoleh melalui penyelidikan tanah di lapangan dan melakukan pengujian melalui sampel tanah dari lapangan di laboratorium.

### 2.4.1 Berat Isi Tanah ( $\gamma$ )

Berat isi tanah merupakan salah satu parameter yang terdapat dalam tanah yang merupakan perbandingan antara berat tanah dengan volume tanah. Tujuan dari pengujian ini yaitu untuk mengetahui kepadatan suatu tanah. Berat isi tanah dapat diperoleh dari pengujian yang dilakukan di laboratorium dengan rumus yang ditunjukkan pada **persamaan 2.1** sebagai berikut :

$$\gamma = \frac{w}{v} \quad (2.1)$$

Dimana :  $\gamma$  = Berat isi tanah ( $\frac{gr}{cm^3} / \frac{kN^3}{m}$ )

$w$  = Berat tanah

$v$  = Volume tanah

**Tabel 2.4** Korelasi N-SPT, berat isi, dan sudut geser terhadap klasifikasi tanah lempung

N-SPT	< 4	3 – 5	6 – 15	6 – 25	>25
Berat isi $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	14 - 18	16 - 18	16 – 18	16 – 20	> 20
Sudut geser dalam $\phi$ (°)	< 25	20 - 50	30 – 60	40-100	>100
Kepadatan	Sangat Lunak	Lunak	Sedang	Keras	Sangat Keras

Sumber : William T et al., 1962

### 2.4.2 Kohesi Tanah ( $c$ ) dan Sudut Geser Dalam ( $\phi$ )

Kohesi tanah merupakan gaya tarik menarik atau lekatan pada tanah sedangkan sudut geser dalam adalah sudut yang terbentuk dari adanya tegangan normal dan tegangan geser pada tanah. Kedua parameter ini memiliki kaitan yang erat karena keduanya berbanding lurus, jika tegangan geser tanah semakin tinggi maka nilai kohesi pada tanahpun akan meningkat. Nilai kohesi dan sudut geser dapat diperoleh dengan melakukan pengujian *direct shear* dan *triaxial* pada laboratorium. Kohesi dan sudut geser dalam memiliki persamaan yang dikenal sebagai *Mohr-coulomb failure criterion*, seperti yang ditunjukkan pada **persamaan 2.2** sebagai berikut :

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi \quad (2.2)$$

Dimana :  $\tau$  = Tegangan geser  
 $C$  = Kohesi tanah  
 $\sigma$  = Tegangan normal  
 $\phi$  = Sudut geser dalam

Sedangkan jika kondisi tanahnya jenuh atau seluruh pori pada tanah terisi air maka muncul persamaan baru seperti pada **persamaan 2.3** sebagai berikut :

$$\sigma = \sigma' + u \quad (2.3)$$

Dimana :  $\sigma$  = Tegangan geser  
 $\sigma'$  = Tegangan efektif  
 $u$  = Tekanan air pori

Nilai korelasi antara kohesi dan sudut geser dalam menurut Burt G Look terhadap tanah berkohesi terdapat pada **tabel 2.5**.

**Tabel 2.5** Korelasi Antara Kohesi dan Sudut Geser terhadap tanah berkohesif

<i>Type</i>	<i>Soil Description</i>	<i>Effective Cohesion</i>	<i>Friction Angle (°)</i>
<i>Cohesive</i>	<i>Soft – Organic</i>	5 – 10	10 – 20
	<i>Soft – Non Organic</i>	10 – 20	15 – 25
	<i>Stiff</i>	20 – 50	20 – 30
	<i>Hard</i>	50 – 100	25 - 30

Sumber : Burt G Look, 2007

### 2.4.3 Modulus Elastisitas (E)

Modulus elastisitas tanah menggambarkan kekakuan material tanah terhadap perubahan bentuk atau deformasi yang disebabkan adanya gaya yang diberikan pada tanah. Nilai modulus elastisitas ini dapat diperoleh dari pengujian *Unconfined Compression Test* dan *Triaxial* di laboratorium. Nilai perkiraan modulus elastisitas tanah pada material tanah dapat dilihat pada **tabel 2.6**.

**Tabel 2.6** Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah

<b>Jenis Tanah</b>	<b>E (kN/m<sup>2</sup>)</b>
Lempung Sangat Lunak	300 – 3000
Lempung Lunak	2000 – 4000
Lempung Sedang	4500 – 9000
Lempung Keras	7000 – 20000
Lempung Sangat Keras	20000 – 42500
Lantau	2000 - 20000

Sumber : Bowles, 1997

### 2.4.4 Poisson Ratio ( $\nu$ )

*Poisson ratio* merupakan nilai yang didapat dari perbandingan antara regangan aksial dengan regangan transversal yang terdapat pada suatu material. Nilai poisson ratio pada berbagai jenis tanah dapat dilihat pada **tabel 2.7**.

**Tabel 2.7** Nilai Poisson Ratio Pada Berbagai Jenis Tanah

Jenis Tanah	Poisson Ratio ( $\nu$ )
Lempung Jenuh	0.40 – 0.50
Lempung Tak Jenuh	0.10 – 0.30
Lempung Berpasir	0.20 – 0.30
Lanau	0.30 – 0.35
Pasir Padat	0.20 – 0.40
Pasir Kasar	0.15
Pasir Halus	0.25
Batu	0.10 – 0.40

Sumber : Bowles, 1997

## 2.5 Perbaikan Tanah

Perbaikan tanah merupakan upaya yang dapat dilakukan untuk memperbaiki tanah dengan karakteristik teknis rendah menjadi material yang layak serta dapat digunakan untuk konstruksi. Prinsip perbaikan tanah ini yaitu mencampurkan tanah yang bermutu rendah dengan zat additif (semen, kapur, bitumen, *fly ash*) sehingga terjadi reaksi kimiawi, perubahan komposisi kimiawi tanah dapat meningkatkan kepadatan, kohesi, dan kekakuan tanah terhadap pembebanan. Beberapa tujuan dari dilakukannya perbaikan tanah yaitu :

1. Meningkatkan daya dukung dan kuat geser tanah.
2. Meningkatkan kepadatan tanah dan mempercepat konsolidasi
3. Mengurangi potensi permeabilitas yang terlalu tinggi
4. Mengatur deformasi yang terjadi (seperti penurunan dan *heaving*)
5. meningkatkan stabilitas tanah
6. Menyalurkan beban timbunan terhadap komponen lain pada lapisan *sub-surface*

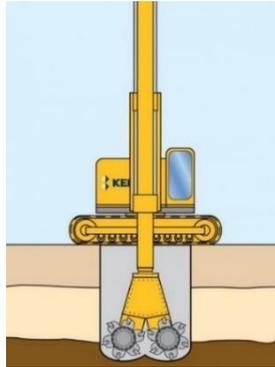
Perbaikan tanah memiliki berbagai macam metode yang dapat digunakan sesuai dengan kebutuhan dan keadaan lingkungan, namun pada penelitian ini perbaikan tanah berfokus pada metode *Deep Mixing* dan Geosintetik saja.

## 2.6 Deep Mixing

Deep mixing merupakan metode untuk memperbaiki, meningkatkan daya dukung dan mengurangi kompresibilitas pada tanah yang akan diperbaiki dengan menggunakan semen atau kapur yang dicampurkan ke tanah pada kedalaman tertentu dengan bantuan auger. Deep mixing memiliki kelebihan dapat diaplikasikan terhadap berbagai jenis tanah, dapat menjangkau kedalaman yang cukup dalam, namun memiliki keterbatasan jika bertemu dengan tanah yang sangat keras atau terdapat batuan karena auger akan cukup kesulitan untuk menembusnya. Deep mixing dapat dilakukan dengan 2 (dua) kondisi yaitu metode basah (*wet method*) dimana material pengikatnya dalam bentuk bubur/cair (*slurry*) dan metode kering (*dry method*) dimana material pengikatnya dalam bentuk bubuk. Deep Mixing memiliki metode lain yang dapat digunakan seperti metode *Cutter Soil Mixing*, metode *T-Shaped DM Columns*, dan metode *Deep Mixed Column* (DMC).

### 2.6.1 Cutter Soil Mixing

*Cutter Soil Mixing* (CSM) merupakan salah satu metode *deep mixing* yang dapat meningkatkan sifat mekanis tanah dan/atau meningkatkan kekuatan dari tanah itu sendiri dengan mencampurkan tanah dilapangan dengan zat kimia berbentuk cair, seperti semen atau bentonit atau gabungan dari keduanya, CSM memiliki dua buah *blade* yang berdampingan sehingga saat melakukan pencampuran, *blade* akan membuat pola seperti parit. Metode ini sering digunakan dalam konstruksi *cut-off* dan *retaining walls*. CSM memiliki berbagai macam fungsi yaitu mengurangi potensi likuifaksi dan meningkatkan kestabilan tanah serta dapat digunakan pada berbagai jenis tanah. Ilustrasi metode CSM dapat dilihat pada **Gambar 2.2**.

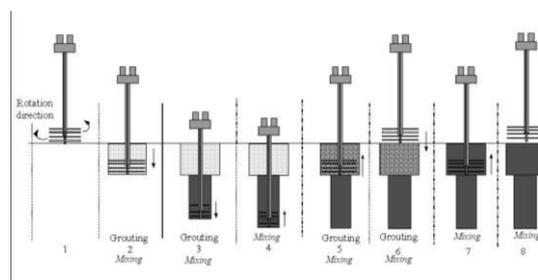


**Gambar 2.2** *Cutter Soil Mixing Method*

Sumber : Keller, 2020

### 2.6.2 *T-Shaped DM Columns*

*T-Shaped DM Columns* (TDM) adalah metode *deep mixing* berikutnya, TDM digunakan untuk meningkatkan kestabilan lereng serta mitigasi penurunan. Pada proses pekerjaannya, semen dalam jumlah yang banyak di semprotkan melalui TDM sehingga dapat bercampur dengan tanah. Dengan bentuk *blade* yang berbeda hasil kolom yang didapatkan pun berbeda, karena pada bagian atas dekat permukaan kolom yang terbentuk dimensinya cukup besar, dibandingkan dengan kolom pada kedalaman yang cukup dalam yang dimensinya lebih kecil sehingga membentuk rupa huruf “T”. Keterbatasan alat ini yaitu TDM hanya digunakan pada tanah yang lunak, namun untuk biaya lebih terjangkau dibanding DMC dan CSM (Song-Yu Liu, Yan-Jun Du, 2012). Ilustrasi metode TDM dapat dilihat pada **Gambar 2.3**.



**Gambar 2.3** *T-Shaped DM Columns Method*

Sumber : S.Y. Liu, 2012

### 2.6.3 *Deep Mixed Columns*

*Deep Mixed Columns* (DMC) merupakan metode *deep mixing* yang tidak jauh berbeda dari TDM, perbedaannya terletak dari bentuk *blade* dan bentuk kolom yang telah dibuat, jika TDM kolomnya berbentuk “T” maka DMC berbentuk “I” karena *blade* pada DMC tidak dapat berubah ukuran layaknya TDM. Keduanya memiliki fungsi yang sama yaitu meningkatkan kestabilan lereng serta mitigasi penurunan. Pada kolom yang telah dibuat dapat ditambah kekuatannya dengan menggunakan *rigid inclusion* seperti tiang beton atau *spun pile*. Metode pelaksanaan *Deep Mixed Column* adalah sebagai berikut :

1. Mempersiapkan alat yang akan digunakan untuk melakukan pengeboran, mulai dari alat berat, alat pengebor (*auger*), dan bahan *mixing* seperti kapur atau semen yang telah diperhitungkan spesifikasinya.
2. Menentukan lokasi yang akan dijadikan tempat pengeboran dan tempat berdirinya kolom DMC. Sebelum melakukan pengeboran pastikan area telah dibersihkan, jika ada hambatan seperti batu keras maka dapat dilakukan pengeboran terlebih dahulu.
3. Lakukan pengeboran dengan *auger* DMC dimana terdapat lubang untuk menginjeksikan campuran zat kimia pada lokasi yang telah ditentukan. Contoh *auger* pada DMC dapat dilihat pada **Gambar 2.4**.
4. Pengeboran umumnya dilakukan secara tiga tahap, tahap pertama adalah pengeboran dilakukan untuk membentuk pola kolom, tahap kedua saat *auger* ditarik keluar, injeksi zat kimia juga dilakukan sambil tetap memutar *auger*, tahap ketiga yaitu *auger* kembali dimasukkan kedalam dengan tetap menginjeksikan zat kimia, tujuannya agar kolom menjadi padat dan mengurangi udara yang terperangkap didalam. Lalu *auger* ditarik keluar sambil tetap memutar *auger* dengan arah berlawanan.

Informasi mengenai kekuatan dan kekakuan pada DMC pada umumnya didapat dari pengujian *unconfined compression test*, beberapa studi seperti Miura

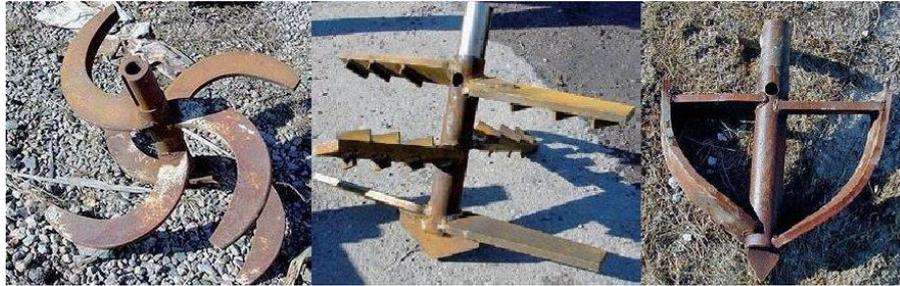
et al. 2002, CDIT 2002, Dong et al. 1996, Shiells et al. 2003, Matsuo 2002, Bruce 2001, Jacobson et al. 2005, EuroSoilStab 2002 menunjukkan nilai *unconfined compression strength* ( $q_u$ ), dari *deep mixed* material meningkat seiring dengan peningkatan bahan kimia, peningkatan efisiensi pencampuran, lama waktu *curing*, dan pengaruh *water content*. Parameter DMC dengan metode kering dan basah dapat dilihat pada **Tabel 2.8**.

**Tabel 2.8** Parameter *Deep Mixed Column*

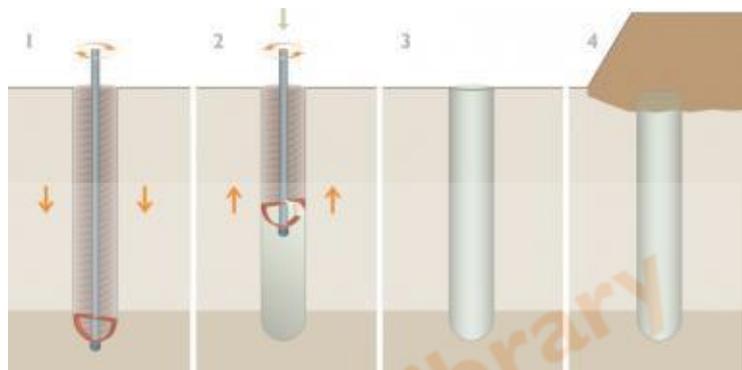
Jenis	Kering ( <i>Dry</i> )	Basah ( <i>Wet</i> )
<i>Values of Unconfined Compressive Strength, <math>q_u</math></i>	2 - 400 psi	20 – 4.000 psi
<i>Coefficient of Variation</i>	0.15 - 0.75	
<i>Young's modulus of elasticity determined at 50% of the unconfined compressive strength, <math>E_{50}</math></i>	50 - 250	75 - 1000
<i>Poisson's ratio, <math>\nu</math></i>	0.25 - 0.50	
<i>Increase Value of Unit Weight Soil After Treated with Deep Mixed</i>	3% - 15%	<i>Negligible</i> (dapat diabaikan)

Sumber : Michael P. Navin, 2005

Pada penelitian ini DMC digunakan pada lereng, dimana pada lereng tersebut sudah ada lembaran geotekstil yang sudah diaplikasikan. Ilustrasi metode DMC dapat dilihat pada **Gambar 2.5** dan Ilustrasi DMC beserta lereng pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 2.6**

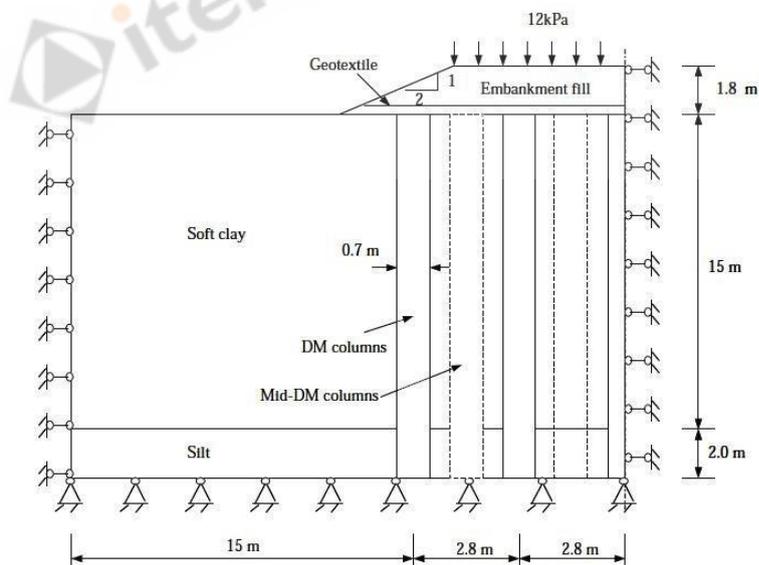


**Gambar 2.4** *Blade Auger* pada DMC



**Gambar 2.5** *Deep Mixed Columns Method*

Sumber : Keller, 2020



**Gambar 2.6** Ilustrasi Pengaplikasian DMC pada Lereng

Sumber : J.Han et al., 2005

## 2.7 Geosintetik

Geosintetik merupakan bahan buatan berbentuk lembaran yang terbuat dari bahan *polymer* dengan jaringan – jaringan tertentu sehingga memungkinkan untuk terikat dengan tanah, batuan, atau material geoteknik lainnya yang digunakan untuk pekerjaan buatan manusia maupun struktur (ASTM D 4439). Geosintetik menjadi salah satu opsi yang sering digunakan dalam pekerjaan yang berkaitan dengan tanah dan batuan karena memiliki banyak fungsi seperti perkuatan, separator, drainase, filtrasi, penahan air, dan proteksi. Terdapat berbagai macam geosintetik antara lain geotekstil, *geogrid*, geokomposit, geomembran, *geocell*, dan *geospacer*.

### 2.7.1 Geotekstil

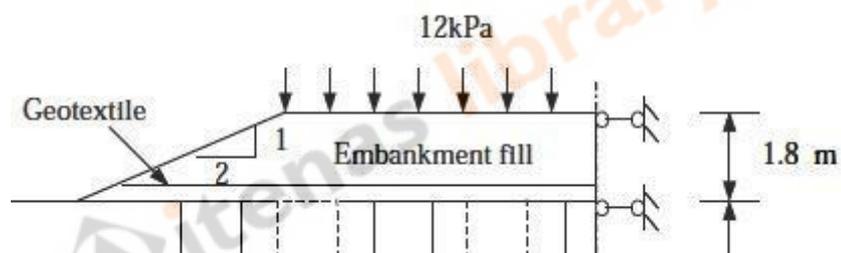
Geotekstil merupakan salah satu macam geosintetik yang sering sekali digunakan dalam suatu konstruksi yang berhubungan dengan tanah atau batuan. Geotekstil sendiri yaitu lembaran sintesis tipis dan flexible, yang berfungsi untuk perkuatan tanah lunak, menyebarkan beban yang diterima ke fondasi atau tanah, sebagai penyaring, drainase, dan lapisan pelindung. Geotekstil dapat digunakan diatas tanah lunak, diatas fondasi tiang atau kolom, diatas tanah timbunan atau lereng dan sebagainya.

Geotekstil memiliki dua tipe yaitu geotekstil *woven* dan geotekstil *non-woven*, dimana perbedaan kedua tipe itu terletak dari susunan seratnya, bila *woven* susunannya dipasang pada sudut dan konfigurasi tertentu sedangkan *non-woven* susunan serat terikat dengan acak lalu dilebur dengan panas, ditusuk jarum atau resin. Pada penelitian ini geotekstil di aplikasikan pada timbunan yang dibawahnya terletak DMC. Contoh penggunaan geotekstil pada lereng dapat dilihat pada **Gambar 2.7** dan ilustrasi penggunaan geotekstil pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 2.8**.



**Gambar 2.7** Pengaplikasian Geotekstil pada Lereng

Sumber : sinogeotextile, 2015



**Gambar 2.8** Pengaplikasian Geotekstil di Timbunan

Sumber : J.Han et al., 2005

Geotekstil *woven* dan *non-woven* memiliki berbagai macam jenis bahan utama yang digunakan, dan dari berbagai jenis bahan itu terdapat beberapa kelebihan yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan dilapangan dan biaya. Contohnya seperti geotekstil *woven circular* dengan spesifikasi yang ditunjukkan pada **Tabel 2.8** dan geotekstil *non-woven polyester* dengan spesifikasi yang ditunjukkan pada **Tabel 2.9** yang merupakan produksi dari PT.Prima Geotex Indo dan telah diuji coba di Balai Besar Tekstil Bandung.

**Tabel 2.9** Spesifikasi Geotekstil *Woven Circular*

<i>Item</i>	<i>Test Method</i>	<i>Unit</i>	<b>150 gr</b>	<b>200 gr</b>	<b>250 gr</b>
<i>Colour</i>	ASTM D5261	-	Black		
<i>Tensile Strength</i>	ASTM D4595 – 11	kN/m	MD = 32 CD = 30	MD = 44 CD = 42	MD = 54 CD = 52
<i>Elongation</i>	ASTM D4595 – 11	%	MD = 20 CD = 18	MD = 21 CD = 20	MD = 22 CD = 21
<i>CBR Burst Strength</i>	ASTM D6241 – 14	N	5950	6280	6592
<i>Grab Strength</i>	ASTM D4533 – 15	N	MD = 1053 CD = 1008	MD = 1435 CD = 1295	MD = 2018 CD = 1450
<i>Index Puncture</i>	ASTM D4833 – 07	N	640	723	873

(MD = machine direction, CD = cross-machine direction)

**Tabel 2.10** Spesifikasi Geotekstil *Non-Woven Polyester*

<i>Item</i>	<i>Test Method</i>	<i>Unit</i>	<b>150 gr</b>	<b>200 gr</b>	<b>250 gr</b>
<i>Thickness</i>	ASTM D5199 – 12	mm	1,1	1,5	1,7
<i>Tensile Strength</i>	ASTM D4595 – 11	kN/m	7,1	8,4	10,5
<i>Elongation</i>	ASTM D4595 – 11	%	≥50	≥50	≥50
<i>CBR Burst Strength</i>	ASTM D6241 – 14 Probe 50mm	N	1017,3	1255,7	1399
<i>Tearing Strength</i>	ASTM D4533 – 15	N	280	370	479
<i>Index Puncture</i>	ASTM D4833 – 07 Probe 8mm	N	170	225	315

Sumber : PT. Prima Geotex Indo, 2020

## 2.8 Teori Mohr-Coulomb

Mohr-Coulomb merupakan suatu teori keruntuhan yang dikemukakan oleh Mohr (1900), dimana Mohr menyatakan bahwa keruntuhan material terjadi bukan hanya akibat tegangan normal atau tegangan geser kondisi maksimum saja, namun

dapat terjadi karena adanya kombinasi kritis dari tegangan normal dan tegangan geser. Model keruntuhan Mohr ini memiliki bentuk melengkung regangan yang *irreversible* atau tidak dapat kembali seperti semula, Persamaan rumus Mohr-Coulomb dapat dilihat pada **Persamaan 2.4**.

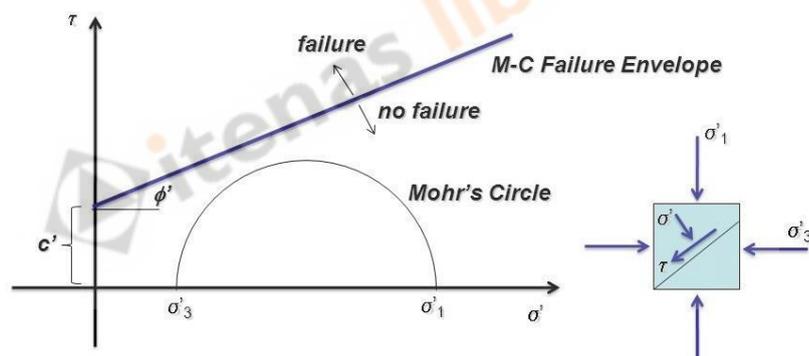
$$\tau = c' + \sigma' \tan (\phi') \quad (2.4)$$

Dimana :  $\tau$  = Tegangan Geser

$c'$  = Kohesi Efektif

$\sigma'$  = Tegangan Efektif

$\phi'$  = Sudut Geser Efektif



**Gambar 2.9** Mohr-Coulomb Failure Criterion

Sumber : William J. Likos, 2006

## 2.9 Finite Element Method

*Finite Element Method* (FEM) merupakan metode numerik untuk menyelesaikan masalah dari permasalahan diferensial, baik itu diferensial biasa maupun persamaan diferensial, karena FEM merupakan salah satu metode yang paling serba guna untuk masalah domain kontinum. Proses dari FEM yaitu membagi kontinum menjadi bagian-bagian kecil yang biasa disebut elemen

menjadi lebih sederhana dan lebih mudah diperoleh. Setelah proses FEM selesai maka solusi elemen – elemen tersebut menjadi solusi keseluruhan kontinum. Pembagian sebuah kontinum menjadi berbagai elemen tidak harus memiliki bentuk dan ukuran yang sama melainkan harus kontinu dan kompatibel (Winarni, 2005).

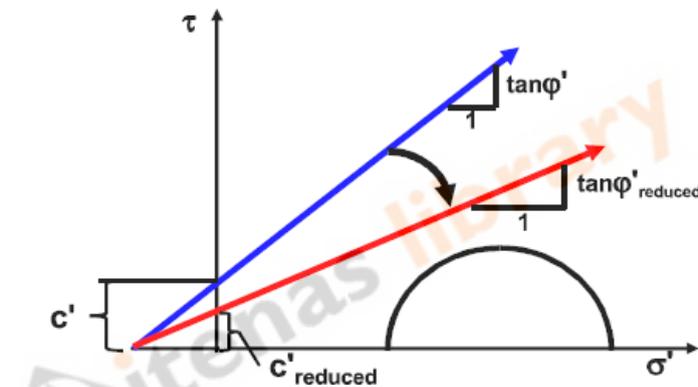
Metode FEM memiliki fungsi yang lebih baik dibanding metode konvensional seperti limit equilibrium dalam perhitungan tegangan dan pergerakan tanah, Penggunaan metode FEM dalam perhitungan kestabilan lereng memiliki berbagai macam kelebihan menurut Pedoman Konstruksi dan Bangunan (Pd T-06-2004-B) diantaranya seperti :

1. Tidak diperlukan asumsi terhadap lokasi dan bentuk bidang gelincir, karena keruntuhan akan terjadi pada tempat dimana kuat geser tanah tidak mampu menahan gaya geser yang bekerja.
2. Metode FEM mempertahankan kesetimbangan secara global hingga keruntuhan terjadi, Metode ini juga tidak menggunakan irisan – irisan pada massa tanah yang mengalami longsor sehingga simplikasi terhadap gaya sisi irisan tidak diperlukan.
3. Metode FEM menggabungkan analisis deformasi dan analisis stabilitas pada setiap tahapan sehingga faktor keamanan pada setiap tahapan dapat diketahui serta perhitungan menjadi lebih efisien.
4. Keruntuhan progresif serta keruntuhan geser keseluruhan dapat terilustrasi pada metode FEM, dengan membuat kontur regangan geser yang telah dianalisis maka bidang gelincir dapat diketahui.

Terdapat metode yang umum digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng yaitu metode *phi-c-reduction* dimana nilai parameter  $\phi$  ( $\phi$ )/ sudut geser dan nilai parameter kohesi ( $c$ ) dikurangi secara bertahap hingga tercapai keruntuhan pada lereng dan didapat nilai faktor keamanan berdasarkan persamaan *phi-c-reduction*. Persamaan *phi-c-reduction* sebagai berikut :

$$\Sigma M_{SF} = \frac{C}{C'_{reduction}} = \frac{\tan\phi'}{\tan\phi'_{reduction}} \quad (2.5)$$

Dimana : MSF = Faktor keamanan  
 C = Kohesi  
 C'reduction = Kohesi yang di reduksi  
 $\phi'$  = Sudut geser  
 $\phi'$ reduction = Sudut geser yang direduksi



**Gambar 2.10** Grafik *Phi-C-Reduction*

Sumber : Helmut F. Schweiger, 2019

## 2.10 Penelitian Terkait

Pada pengerjaan tugas akhir ini terdapat beberapa penelitian terkait yang menjadi dasar penulisan tugas akhir ini, diantaranya yaitu “*2D Numerical Modeling of A Constructed Geosynthetic-Reinforced Embankment Over Deep Mixed Column*” (2005), oleh J.Han, J.Huang, dan A. Porbaha, serta “*Numerical Modeling of Geotextile Reinforced Embankments Over Deep Cement Mixed Columns Incorporating Strain Softening Behaviour of Column*” (2013), oleh N.N.S. Yapage, D.S. Liyanapathirana, H.G. Poulos, R.B. Kelly, dan C.J. Leo.

Pada penelitian yang berjudul *2D Numerical Modeling of A Constructed Geosynthetic-Reinforced Embankment Over Deep Mixed Column*, para peneliti

sebelumnya memperhatikan hasil dari tegangan maksimum geotekstil dan *vertical displacement* atau penurunan yang didasari pada penggunaan DMC dan Mid-DMC menggunakan aplikasi FLAC 2D, dimana kondisi tanah yang diberikan DMC beserta Mid-DMC merupakan kombinasi dengan hasil yang paling efektif, karena penurunan yang terjadi berkurang cukup signifikan dibanding tanpa menggunakan Mid-DMC, selain itu perubahan juga terlihat pada geotekstil yang mengakibatkan tegangan maksimum yang terjadi pada geotekstil menurun, hasil penurunan dapat dilihat pada **Tabel 2.11**.

**Tabel 2.11** Penurunan Maksimum dan Tegangan Maksimum pada Geotekstil

<i>Result</i>	<i>Measured</i>	<i>Numerical Analysis</i>	
		<i>Without Mid-Column</i>	<i>With Mid-Column</i>
Max. Settlement (mm)	110-120 (104)	196 (127)	110 (100)
Max. Tension (kN/m)	3.6 – 18.0	18.3	7.3

Angka dalam *parenthesis* ( ) menunjukkan nilai penurunan pada dinding DMC.

Sedangkan pada penelitian berjudul “*Numerical Modeling of Geotextile Reinforced Embankments Over Deep Cement Mixed Columns Incorporating Strain Softening Behaviour of Column*”, para peneliti sebelumnya memperhatikan hasil dari perbedaan penurunan, regangan dan tegangan pada geotekstil dan *vertical displacement* atau penurunan yang didasari pada penggunaan *isolated column and overlapped column* dan hanya *overlapped column* menggunakan aplikasi ABAQUS. Tidak jauh berbeda dengan penelitian sebelumnya dimana jika pengujian dilakukan dengan mengkombinasikan 2 kolom (DMC dan Mid-DMC serta *isolated* dan *overlapped*), maka didapatkan hasil yang menunjukkan bahwa kombinasi 2 kolom mendapatkan hasil yang lebih baik dibanding menggunakan satu variasi kolom saja.