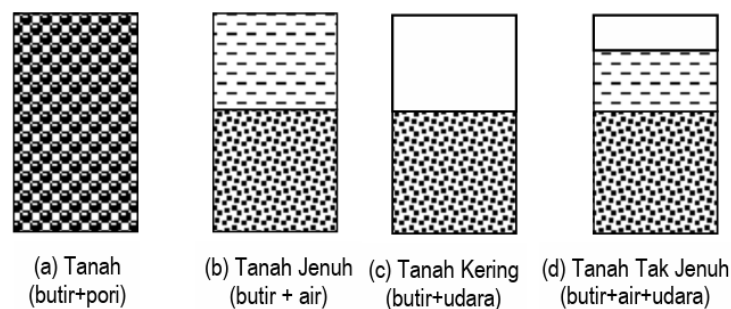


2. LANDASAN TEORI

2.1 Tanah Lunak

Tanah terdiri dari campuran mineral dan unsur organik yang berbentuk padat, gas, dan berair. Tanah terdiri dari lapisan partikel yang berbeda dari bahan aslinya dalam hal sifat fisik, mineralogi dan kimia akibat interaksi antara hidrosfer dan atmosfer atau akibat faktor lain. Partikel tanah berbentuk dari batuan pecah yang telah berubah oleh faktor kimia dan lingkungan, seperti erosi dan cuaca. Partikel tanah tersusun secara longgar, menciptakan formasi tanah yang terdiri dari ruang pori (Panguriseng, 2018).

Terdapat tiga unsur dalam material tanah, yakni butiran, air dan udara. Butiran dan air merupakan tanah dalam kondisi jenuh sedangkan unsur butiran dan udara terdapat pada kondisi tanah yang kering dan pada tanah dengan unsur butiran, air dan udara terdapat pada kondisi tak jenuh. Beberapa kondisi tanah tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1 (Panguriseng, 2018).



Gambar 2.1 Komposisi Tanah Dalam Berbagai Kondisi

Dalam pedoman geoteknik 1 tentang proses pembentukan dan sifat-sifat dasar tanah lunak (Departemen Kimpraswil, 2002) definisi tanah lunak adalah tanah-tanah yang jika tidak dikenali dan diselidiki secara seksama dapat menyebabkan masalah ketidakstabilan dan penurunan jangka Panjang yang tidak dapat ditolerir, tanah tersebut mempunyai kuat geser yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi. Tanah lunak dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu lempung lunak dan gambut.

1. Lempung Lunak

Tanah jenis lempung lunak merupakan tanah yang mengandung mineral lempung dan mengandung kadar air yang tinggi sehingga menyebabkan kuat geser yang rendah. Tanah lempung dengan konsistensi lunak dan sangat lunak dalam rekayasa geoteknik dapat didefinisikan dengan kuat geser seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1 (Departemen Kimpraswil, 2002).

Tabel 2.1 Definisi Kuat Geser Tanah Lempung

Konsistensi	Kuat Geser kN/m ²
Lunak	12,5 - 25
Sangat Lunak	< 12,5

Sebagai indikasi dari kekuatan lempung tersebut, karakteristik tanah lunak dapat ditentukan berdasarkan Tabel 2.2 (Departemen Kimpraswil, 2002).

Tabel 2.2 Indikator Kuat Geser Tak Terdrainase Tanah Lempung Lunak

Konsistensi	Indikasi Lapangan
Lunak	Bisa dibentuk dengan mudah oleh jari tangan
Sangat Lunak	Keluar di antara jari Tengah jika diremas dalam kepalan tangan

2. Gambut

Tanah jenis gambut adalah tanah yang pembentuk utamanya terdiri dari sisa-sisa tumbuhan. Selain itu, terdapat jenis tanah lempung organik yang merupakan suatu material campuran antara lempung dan gambut, tergantung pada jenis dan kuantitas sisa-sisa tumbuhan, tanah organik bisa berperilaku seperti lempung atau

gambut. Klasifikasi tanah gambut tersebut dapat dibedakan berdasarkan kadar organiknya, dapat diketahui pada Tabel 2.3 (Departemen Kimpraswil, 2002).

Tabel 2.3 Tipe Tanah Berdasarkan Kadar Organik

Jenis Tanah	Kadar Organik (%)
Lempung	> 25
Lempung Lunak	25 – 75
Gambut	> 75

2.2 Interpretasi Data Tanah

2.2.1 Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah pada umumnya dapat dilakukan berdasarkan sifat dan ukuran partikelnya. Tujuan sistem klasifikasi tanah adalah untuk mengelompokkan tanah berdasarkan sifat yang serupa, yaitu sifat geoteknik seperti permeabilitas, kekuatan geser, dan kemampuan tekan yang signifikan.

Berdasarkan ukuran partikelnya tanah dapat diklasifikasikan menjadi empat yaitu kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau, (*silt*), dan lempung (*clay*). Tabel 2.4 Menunjukkan klasifikasi tanah berdasarkan ukuran butir dari berbagai sumber (Hardiyatmo, 2019).

Tabel 2.4 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Ukuran Butir

No	Name of Organization	Grain Size (mm)			
		Gravel	Sand	Silt	Clay
1	Massachusetts Institute of Technology (MIT)	> 2	2 – 0,06	0,06 – 0,002	< 0,002

No	Name of Organization	Grain Size (mm)			
		Gravel	Sand	Silt	Clay
2	U.S Departement of Agriculture (USDA)	> 2	2 – 0,05	0,05 – 0,002	< 0,002
3	American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	76,2 - 2	2 – 0,075	0,075 – 0,002	< 0,002
4	Unifed Soil Clasification System (USCS)	76,2 – 4,75	4,75 – 0,075	< 0,075	< 0,075

Pengklasifikasian tanah pada umumnya dapat dilakukan dengan dua cara yaitu *Unifed Soil Clasification System* (USCS) dan *American Association of State Highway Officials* (AASHTO).

2.2.1.1 Klasifikasi Tanah Menurut USCS

Unifed Soil Clasification System (USCS) merupakan sistem klasifikasi tanah yang umum digunakan untuk mengelompokkan tanah berdasarkan sifat fisiknya. Jika < 50% lolos saringan nomor 200, tanah diklasifikasikan sebagai tanah berbutir kasar (kerikil dan pasir). Sedangkan, jika > 50% lolos saringan nomor 200, tanah diklasifikasikan sebagai tanah halus (lanau/lempung). Terdapat simbol-simbol yang digunakan dalam klasifikasi sistem USCS yaitu sebagai berikut:

G = kerikil (*gravel*)

S = pasir (*sand*)

C = lempung (*clay*)

M = lanau (*silt*)

O = lanau atau lempung organik (*organic silt or clay*)

Pt = tanah gambut dan tanah organik tinggi (*peat and highly organic soil*)

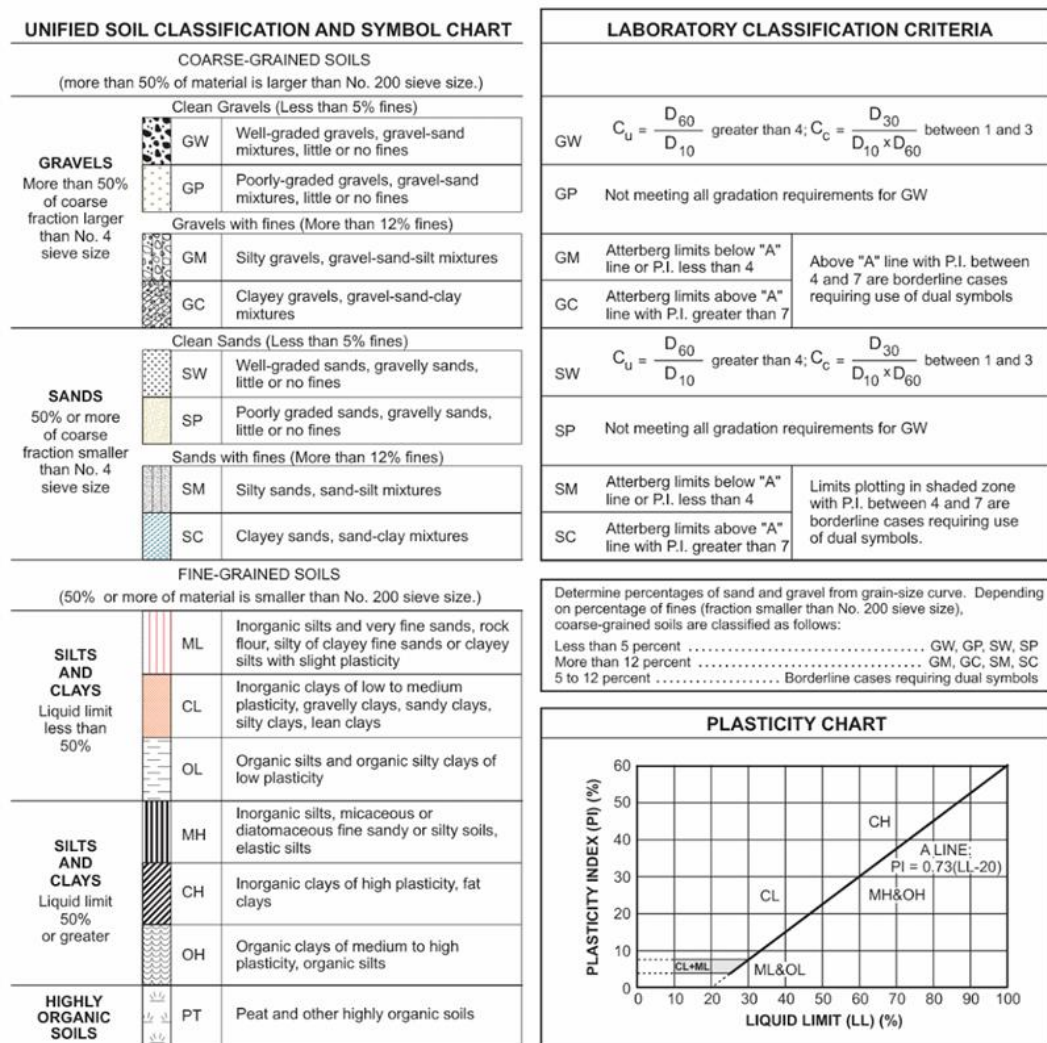
W = gradasi baik (*well-graded*)

P = gradasi buruk (*poorly-graded*)

H = Plastisitas Tinggi (*high-plasticity*)

L = plastisitas rendah (*low-plasticity*)

Pengklasifikasian tanah ditentukan dalam sejumlah kelompok dan sub kelompok yang dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Klasifikasi Tanah Berdasarkan USCS

2.2.1.2 Klasifikasi Tanah menurut AASHTO

Sistem klasifikasi AASHTO digunakan untuk menentukan kualitas tanah dalam perancangan timbunan jalan, *subbase*, dan *subgrade*. Sistem ini membagi tanah ke dalam 7 kelompok, A-1 sampai A-7 yang dapat dilihat pada Tabel 2.5 .

Tabel 2.5 Klasifikasi Tanah Berdasarkan AASHTO

Klasifikasi Umum	Tanah Berbutir (35 Atau Kurang Dari Seluruh Contoh Tanah Lolos Ayakan No. 200)							Tanah Lanau-Lempung (Lebih Dari 35 % Dari Seluruh Contoh Tanah Lolos Ayakan No. 200)			
Klasifikasi Kelompok	A-1		A3	A2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 *
											A-7-6 *
Analisis ayakan (% lolos)	≤ 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
No. 10	≤ 30	≤ 50	≤ 51	-	-	-	-	-	-	-	-
No. 40	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≥ 36	≥ 36	≥ 36	≥ 36
No. 200											
Sifat fraksi yang lolos ayakan	-		-	≤ 41	≥ 41	≤ 40	≥ 40	≤ 40	≤ 41	≤ 40	≥ 40
	≤ 6		NP	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11

Klasifikasi Umum	Tanah Berbutir (35 Atau Kurang Dari Seluruh Contoh Tanah Lolos Ayakan No. 200)						Tanah Lanau-Lempung (Lebih Dari 35 % Dari Seluruh Contoh Tanah Lolos Ayakan No. 200)			
No. 40 batas cair (LL) Indeks elastisitas (PI)										
Tipe material yang paling dominan	Batu pecah, kerikil dan pasir	Pasir halus	Kerikil dan pasir yang berlanau atau berlempung				Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian sebagai bahan dasar tanah	Baik sekali sampai baik						Sedang sampai jelek			

2.2.2 Parameter Tanah

Parameter tanah adalah ukuran atau acuan untuk mengetahui atau menilai hasil suatu proses perubahan yang terjadi dalam tanah baik dari sifat fisik dan jenis tanah. Parameter tanah di dapat dari tabel korelasi nilai tipikal parameter tanah yang dijabarkan sebagai berikut:

1. Berat isi tanah (γ)

Nilai korelasi berat volume tanah normal dan saturasi dapat diinterpolasikan berdasarkan nilai korelasi pada Tabel 2.6 (Ameratunga dkk., 2016) yang disesuaikan dengan nilai N-SPT lapisan tanah.

Tabel 2.6 Nilai Tipikal Berat Volume Tanah Normal dan Saturasi

<i>Soils Type</i>		<i>Bulk Unit Weight (kN/m³)</i>		<i>Saturated Unit Weight (kN/m³)</i>	
		<i>Loose</i>	<i>Dense</i>	<i>Loose</i>	<i>Dense</i>
<i>Granular Soils</i>	<i>Gravel</i>	16,0	18,00	0,0	21,0
	<i>Well graded sand and Gravel</i>	19,0	21,0	1,5	23,0
	<i>Coarse or medium sand</i>	16,5	18,5	0,0	21,5
	<i>Well graded sand and gravel</i>	18,0	21,0	0,5	22,5
	<i>Fine or silty sand</i>	17,0	19,0	0,0	21,5
	<i>Rock fill</i>	15,0	17,5	9,5	21,0
	<i>Brick Hardcore</i>	13,0	17,5	6,5	19,0

<i>Soils Type</i>		<i>Bulk Unit Weight (kN/m³)</i>		<i>Saturated Unit Weight (kN/m³)</i>	
		<i>Loose</i>	<i>Dense</i>	<i>Loose</i>	<i>Dense</i>
	<i>Slag fil</i>	12,0	15,0	8,0	20,0
	<i>Ash fill</i>	6,5	10,0	3,0	15,0
<i>Cohesive soils</i>	<i>Peat</i>	12,0		12,0	
	<i>Organic clay</i>	15,0		15,0	
	<i>Soft clay</i>	17,0		17,0	
	<i>Firm clay</i>	18,0		18,0	
	<i>Stiff clay</i>	19,0		19,0	
	<i>Hard clay</i>	20,0		20,0	
	<i>Stiff or hard glacial clay</i>	21,0		21,0	

2. Angka pori (e)

Nilai korelasi parameter angka pori dan Tanah dan *dry unit wight* dapat diinterpolasikan berdasarkan nilai korelasi pada Tabel 2.7 (Das & Sobhan, 2014) yang disesuaikan dengan nilai N-SPT lapisan tanah.

Tabel 2.7 Nilai Tipikal Angka Pori, Kadar Air, dan Berat Isi Kering

<i>Type of Soil</i>	<i>Void Ratio</i>	<i>Natural Moisture content in a saturated state (%)</i>	<i>Dry unit weight, γ_d (kN/m³)</i>
<i>Loose uniform sand</i>	0,8	30	14,5
<i>Dense uniform sand</i>	0,45	16	18
<i>Loose angular-grained silty sand</i>	0,65	25	16
<i>Dense angular-grained silty sand</i>	0,4	15	19
<i>Stiff clay</i>	0,6	21	17
<i>Soft clay</i>	0,9 – 1,4	30 – 50	11,5 – 14,5
<i>Loess</i>	0,9	25	13,5
<i>Soft organic clay</i>	1,5 – 3,2	90 – 120	6 – 8
<i>Glacial till</i>	0,3	10	21

3. Kohesi (c_u) dan sudut geser (ϕ) tanah

Nilai korelasi parameter sudut geser dan kohesi dapat diinterpolasikan berdasarkan nilai korelasi pada Tabel 2.8 (Terzaghi dkk., 1967) dan Tabel 2.9 (Meyerhoff, 1956) yang disesuaikan dengan nilai N-SPT lapisan tanah.

Tabel 2.8 Variasi Korelasi N-SPT dengan c_u Tanah Lempung

<i>Consistency</i>	N	c_u (kN/m³)
<i>Very soft</i>	0-2	< 12
<i>Soft</i>	2-4	12-25
<i>Medium</i>	4-8	25-50
<i>Stiff</i>	8-15	50-100
<i>Very stiff</i>	15-30	100-200
<i>Hard</i>	>30	>200

Tabel 2.9 Korelasi q_c dan D_r dengan sudut Geser dalam Tanah

<i>Density</i>	<i>Relative density</i>	N-SPT	q_c, in MPa	<i>Approximate triaxial friction angle (degrees)</i>
<i>Very loose</i>	<0,2	<4	<2	<30
<i>Loose</i>	0,2-0,4	4-10	2-4	30-35
<i>Medium dense</i>	0,4-0,6	10-30	4-12	35-40
<i>Dense</i>	0,6-0,8	30-50	12-20	40-45
<i>Very dense</i>	>0,8	>50	>20	>45

4. Kohesi efektif (c') dan sudut geser efektif (ϕ')

Nilai korelasi parameter sudut geser efektif dan kohesi efektif dapat diinterpolasikan berdasarkan nilai korelasi pada Tabel 2.10 (Ameratunga dkk., 2016) yang disesuaikan dengan nilai N-SPT lapisan tanah.

Tabel 2.10 Kohesi Efektif dan Sudut Geser Efektif Tanah

Soil Group	Typical Soils in Group	Soil Parameters	
		c' (kPa)	ϕ' (degrees)
<i>Poor</i>	<i>Soft and firm clay of medium to high plasticity; silty clays; loose variable clayey fills; loose sandy silts</i>	0 - 5	17 - 25
<i>Average</i>	<i>Stiff sandy clays; gravelly clays; compact clayey sands and sandy silts; compacted clay fills</i>	0 - 10	26 - 32
<i>Good</i>	<i>Gravelly sands; compacted sands; controlled crushed sandstone and graveled fills; dense well graded sands</i>	0 - 5	32 - 37
<i>Very Good</i>	<i>Weak weathered rock; controlled fills of road base; gravel and recycled concrete</i>	0 - 25	36 - 43

5. Modulus Elastisitas

Nilai korelasi parameter modulus elastisitas dapat diinterpolasikan berdasarkan nilai korelasi pada Tabel 2.11 (Look, 2007) yang disesuaikan dengan nilai N-SPT lapisan tanah.

Tabel 2.11 Modulus Elastisitas Tanah

<i>Type</i>	<i>Strength of Soil</i>	<i>Elastic Modulus, E (MPa)</i>	
		<i>Short term</i>	<i>Long term</i>
<i>Gravel</i>	<i>Loose</i>	25 – 50	
	<i>Medium</i>	50 – 100	
	<i>Dense</i>	100 – 200	
<i>Medium to coarse sand</i>	<i>Very loose</i>	<5	
	<i>Loose</i>	3 – 10	
	<i>Medium dense</i>	8 – 30	
	<i>Dense</i>	25 – 50	
	<i>Very dense</i>	40 – 100	
<i>Fine sand</i>	<i>Loose</i>	5 – 10	
	<i>Medium</i>	10 – 25	
	<i>Dense</i>	25 – 30	
<i>Silt</i>	<i>Soft</i>	<10	<8
	<i>Stiff</i>	10 – 20	8 – 15
	<i>Hard</i>	>20	>15
<i>Clay</i>	<i>Very soft</i>	<3	<2
	<i>Soft</i>	2 – 7	1 – 5
	<i>Firm</i>	5 – 12	4 – 8
	<i>Stiff</i>	10 – 25	7 – 20
	<i>Very stiff</i>	20 – 50	15 – 35
	<i>Hard</i>	40 – 80	30 – 60

6. Indeks kompresi (C_c)

Nilai korelasi parameter indeks kompresi (C_c) dapat diinterpolasikan berdasarkan nilai korelasi pada Tabel 2.12 (Bentley & Carter, 2016) yang disesuaikan dengan nilai N-SPT lapisan tanah.

Tabel 2.12 Nilai Indeks Kompresi

<i>Type of Clay</i>	<i>Descriptive term</i>	<i>Coefficient of volume compressibility, m_v (m²/MN)</i>	<i>Compression index, C_c</i>
<i>Hard, heavily overconsolidated Glacial Till (Boulder Clay), stiff weathered rocks (e.g. completely weathered mudstone) and hard clays</i>	<i>Very low compressibility</i>	$<0,05$	0,025
<i>Stiff glacial till (boulder clay), marls, very stiff tropical residual clays</i>	<i>Low compressibility</i>	0,05 – 0,1	0,025 – 0,05
<i>Firm clays, glacial outwash clays, consolidated lake deposits,</i>	<i>Medium compressibility</i>	0,1 – 0,3	0,05 – 0,15

<i>Type of Clay</i>	<i>Descriptive term</i>	<i>Coefficient of volume compressibility, m_v (m²/MN)</i>	<i>Compression index, C_c</i>
<i>weathered marls, firm glacial till, normally consolidated clays at depth, firm tropical residual clays</i>			
<i>Poorly consolidated alluvial clays such as estuarine deposits, and sensitive clays</i>	<i>High compressibility</i>	0,3 – 1,5	0,15 – 0,75
<i>Highly organic alluvial clays and peats</i>	<i>Very high compressibility</i>	>1,5	0,75 – 5+
<p>^a Related to the coefficient of volume compressibility m_v.</p> <p>^b Based on an initial voids of 0,5 and initial and final pressures of 100 kPa and 200 kPa, respectively.</p>			

7. Indeks swelling (C_s) dan Indeks Rebound (C_r)

Indeks swelling (C_s) dan Indeks Rebound (C_r) dapat dihitung dengan persamaan berdasarkan (Ameratunga dkk., 2016) berikut.

$$C_s \approx \frac{1}{2} \text{ sampai } \frac{1}{10} C_c$$

8. Koefisien konsolidasi arah vertikal (C_v) dan arah horizontal (C_h)

Nilai korelasi parameter Koefisien konsolidasi arah vertikal (C_v) dapat diinterpolasikan berdasarkan nilai korelasi pada Tabel 2.13 (Bentley & Carter, 2016) yang disesuaikan dengan nilai N-SPT lapisan tanah.

Tabel 2.13 Nilai C_v

<i>Soil Type (Unified classification)</i>	C_v	
	cm^2/s	m^2/s
<i>Low plasticity clays (CL)</i>	0,001 – 0,006	3 – 19
<i>Low plasticity glacial lake clays (CL)</i>	0,0006 – 0,0009	2 – 3
<i>Low plasticity mud (CL)</i>	0,0002 – 0,0004	0,6 – 1,2
<i>Medium plasticity clays (CL-CH)</i>	<0,0001 – 0,0003	<0,3 – 0,9
<i>Volcanic silt (MH)</i>	0,0001 – 0,00015	0,3 – 0,5
<i>Organic silt (OL)</i>	0,0002 – 0,001	0,6 – 3,0

Nilai koefisien konsolidasi arah horizontal pada tanah kohesif dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$C_h = 2C_v \quad (2.1)$$

9. Permeabilitas (k)

Nilai korelasi parameter permeabilitas dapat diinterpolasikan berdasarkan nilai korelasi pada Tabel 2.14 (Ameratunga dkk., 2016) yang disesuaikan dengan nilai N-SPT lapisan tanah.

Tabel 2.14 Nilai Permeabilitas

<i>Soil Behaviour Type</i>	<i>Soil Permeability (m/s)</i>
<i>Sensitive fine grained</i>	$3 \times 10^{-9} - 3 \times 10^{-8}$
<i>Organic soils-peats</i>	$1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-6}$
<i>Clays-clay to silty clay</i>	$1 \times 10^{-10} - 1 \times 10^{-7}$
<i>Silt mixtures clayey silt to silty clay</i>	$3 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-7}$
<i>Sand mixtures; silty sand to sandy sand</i>	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-5}$
<i>Sands; clean sand to silty sand</i>	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$
<i>Gravelly sand to sand</i>	$1 \times 10^{-3} - 1$
<i>^aVery stiff sand to clayey sand</i>	$1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-4}$
<i>^aVery stiff fine grained</i>	$1 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-7}$

2.3 Kuat Geser Tanah

Dalam analisis stabilitas lereng kuat geser tanah merupakan parameter penting yang perlu diketahui, menurut teori Mohr (1910) kondisi keruntuhan suatu bahan terjadi oleh akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal dan tegangan geser. Kuat geser tanah merupakan desakan atau tarikan yang diperoleh dengan gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah. Ketika tanah mengalami pembebanan akan ditahan oleh:

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

Adapun persamaan kuat geser tanah menurut coulomb (1776) yaitu

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.2)$$

Keterangan:

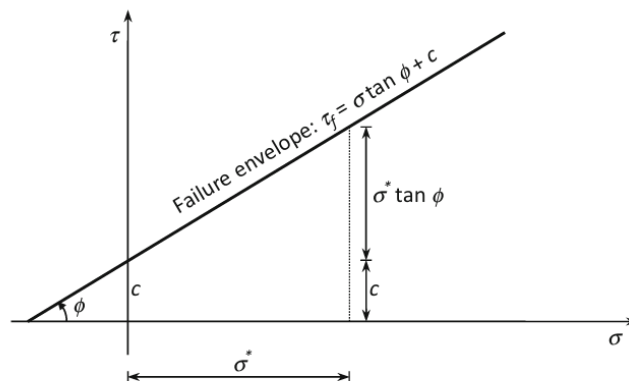
τ = Kuat geser tanah (kN/m²)

c = Kohesi Tanah (kN/m²)

ϕ = Sudut geser tanah (°)

σ = Tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m²)

Persamaan tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.3 dimana $\tan \phi$ adalah kemiringan atau gradien garis dan c adalah perpotongan pada sumbu τ .



Gambar 2.3 kegagalan Mohr-Coulomb

2.4 Tekanan Tanah Lateral

Tekanan tanah lateral adalah gaya yang ditimbulkan oleh akibat dorongan tanah di belakang struktur penahanan tanah. Besarnya tekanan lateral sangat dipengaruhi oleh perubahan letak (*displacement*) dari dinding penahan sifat-sifat tanahnya. Tekanan tanah lateral dapat dibedakan menjadi tiga kondisi yaitu kondisi diam, kondisi aktif dan kondisi pasif (Hardiyatmo, 2019).

Untuk mencari besar tekanan tanah aktif dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_a = K_a \gamma H^2 \quad (2.3)$$

Keterangan:

P_a = Tekanan tanah aktif (kN/m)

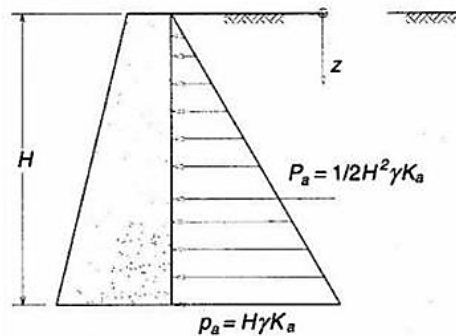
K_a = Koefisien tanah aktif

γ = Berat volume (kN/m³)

H = Kedalaman tanah dihitung dari puncak dinding penahan (m)

Nilai K_a untuk tanah dasar menurut Hardiyatmo.

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.4)$$



Gambar 2.4 Koefisien Tekanan Tanah Aktif

Sedangkan untuk Tekanan tanah pasif dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_p = K_p \gamma H^2 \quad (2.5)$$

Keterangan:

P_p = Tekanan tanah aktif (kN/m)

K_p = Koefisien tanah aktif

γ = Berat volume (kN/m³)

H = Kedalaman tanah dihitung dari puncak dinding penahan (m)

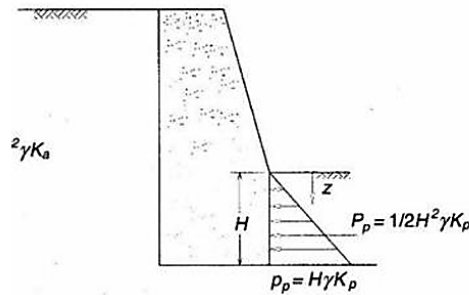
Nilai K_p untuk tanah dasar menurut Hardiyatmo

$$K_p = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.6)$$

Keterangan:

K_p = Koefisien aktif

ϕ = Sudut geser tanah ($^\circ$)



Gambar 2.5 Koefisien Tekanan Tanah Pasif

2.5 Stabilitas Dinding Penahan Tanah

Struktur pada MSE Wall harus stabil baik karena pengaruh eksternal maupun pengaruh internal dengan memenuhi faktor keamanan yang sudah di syaratkan. Stabilitas eksternal (*eksternal stability*) MSE Wall memiliki kriteria yang sama seperti pada struktur dinding penahan tanah konvensional. Stabilitas internal (*internal stability*) mensyaratkan bahwa struktur harus terintegrasi dan dapat berdiri sendiri oleh pengaruh gaya-gaya luar maupun akibat sendiri.

2.5.1 Stabilitas Eksternal

a. Stabilitas Gelincir (*Sliding*)

Stabilitas gelincir (*sliding*) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$CDR = \frac{R_R}{P_d} > 1,5 \quad (2.7)$$

Keterangan:

R_R = Gaya-gaya tahanan horizontal

P_d = Gaya-gaya pendorong horizontal

$$R_R = \gamma_{EV} V_I \times \mu \quad (2.8)$$

Keterangan:

γ_{EV} = Tekanan vertikal dari beban mati timbunan tanah

μ = sudut gesekan tanah minimum

$V_1 = \gamma_r HL$

$$P_d = \gamma_{EH} F_1 + \gamma_{LS} F_2 \quad (2.9)$$

Keterangan:

γ_{EH} = Beban horizontal

γ_{LS} = Beban hidup tambahan

$$F_1 = \frac{1}{2} k_{ab} \gamma_b H^2 \quad (2.10)$$

$$F_2 = k_{ab} qH \quad (2.11)$$

Keterangan:

K_b = Koefisien tanah aktif

γ_b = Berat volume (kN/m^3)

q = Beban merata

H = Kedalaman tanah dihitung dari puncak dinding penahan (m)

b. Stabilitas Guling (*Overturning*)

Stabilitas Guling (*Overturning*) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$Fk_{guling} = \frac{\sum MR}{\sum Mo} > 2 \quad (2.12)$$

Keterangan:

M_R = Momen yang melawan penggulingan

M_O = Momen yang menyebabkan penggulingan

Nilai M_R dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$M = W \times X \quad (2.13)$$

Keterangan:

W = Berat Konstruksi

$$W = \gamma \times b \times H \quad (2.14)$$

Keterangan:

γ = Berat jenis

b = Lebar timbunan

H = Tinggi timbunan

X = jarak beban terhadap ujung dinding penahan

$$X = \frac{1}{2} \times b \quad (2.15)$$

Keterangan:

b = Lebar timbunan

Nilai M_O dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$M = P \times l \quad (2.16)$$

Keterangan

P = Tekanan tanah lateral

l = Jarak

$$l = \left[\frac{1}{2} \times H_1 \right] + H_2 \quad (2.17)$$

Keterangan:

H_1 = Tinggi timbunan tanah biasa

H_2 = Tinggi timbunan sirtu

c. Stabilitas Daya Dukung (*Bearing*)

Tegangan vertikal tidak boleh melebihi daya dukung izin tanah fondasi yang telah ditentukan dengan mempertimbangkan faktor keamanan sebesar 2,5.

$$q_R \geq \sigma_v - f \quad (2.18)$$

Persamaan tegangan vertikal diasumsikan dengan distribusi metode mayerhoff sebagai berikut:

$$\sigma_v - f = \frac{\gamma_{EV-MAX} V_1 + \gamma_{LS} qL}{L - 2e_B} \quad (2.19)$$

Perhitungan daya dukung ultimit, q_{ult} untuk tanah dasar di depan dinding yang rata dan tanpa pengaruh muka air tanah menggabungkan persamaan berikut:

$$q_n = c_f N_c + 0,5 \times L' \times \gamma_f \times N_\gamma \quad (2.20)$$

Keterangan:

c_f = Kohesi (kN/m²)

γ_f = Berat isi tanah (kN/m³)

N_c dan N_γ = koefisien daya dukung tanah

Nilai koefisien daya dukung tanah dapat dilihat pada

Tabel 2.15.

Tabel 2.15 Koefisien Daya Dukung Tanah

ϕ'	N_c	N_q	N_γ	ϕ'	N_c	N_q	N_γ
0	5,7	1,00	0,00	26	27,09	14,21	9,84
1	6,00	1,10	0,01	27	29,24	15,90	11,60
2	6,30	1,22	0,04	28	3,61	17,81	13,70
3	6,62	1,35	0,06	29	37,16	19,98	16,18
4	6,97	1,49	0,10	30	40,41	22,46	19,13
5	7,34	1,64	0,14	31	44,04	25,28	22,65
6	7,73	1,81	0,20	32	48,09	28,52	26,87
7	8,15	2,00	0,27	33	52,64	32,23	31,94
8	8,60	2,21	0,35	34	57,75	36,50	38,04
9	9,09	2,44	0,44	35	63,53	41,44	45,41
10	9,61	2,69	0,56	36	70,01	47,16	54,36
11	10,16	2,98	0,69	37	77,50	53,80	62,27
12	10,76	3,29	0,85	38	85,97	61,55	78,61
13	11,41	3,63	1,04	39	95,66	70,16	95,03

ϕ'	N_c	N_q	N_γ	ϕ'	N_c	N_q	N_γ
14	12,11	4,02	1,26	40	106,81	81,27	115,31
15	12,86	4,45	1,52	41	119,67	93,85	140,51
16	13,68	4,92	1,82	42	134,58	108,75	171,99
17	14,60	5,45	2,18	43	151,95	126,50	211,56
18	15,12	6,04	2,59	44	172,28	147,74	261,60
19	16,56	6,70	3,07	45	196,22	173,28	325,34
20	17,69	7,74	3,64	46	224,55	204,19	407,11
21	18,92	8,26	4,31	47	258,28	241,80	512,84
22	20,27	9,19	5,09	48	258,28	287,85	650,67
23	21,75	10,23	6,00	49	298,71	344,63	831,99
24	23,36	11,40	7,08	50	347,50	415,14	1072,80
25	25,13	12,72	8,34				

2.5.2 Stabilitas Internal

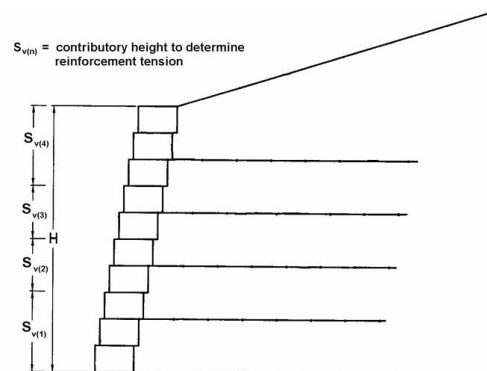
Setiap perkuatan dalam menganalisis kestabilan internal memberikan gaya tarik maksimum yang dihitung melalui persamaan sebagai berikut:

$$T_{\max} = \sigma_H S_v \quad (2.21)$$

Keterangan:

σ_H = Tegangan horizontal

$S_{v(n)}$ = Panjang distribusi tekanan lateral aktif setiap perkuatan pada MSE Wall



Gambar 2.6 Distribusi Kuat Tarik Maksimum pada Setiap Perkuatan

Bidang keruntuhan rankine merupakan bidang keruntuhan potensial dalam zona perkuatan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\psi = 45^\circ + \frac{\phi_r}{2} \quad (2.22)$$

a. Kegagalan Tarik

Faktor keamanan terhadap kegagalan tarik dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$T_{\max} \leq T_r \quad (2.23)$$

$$T_r = \Phi T_{al}$$

T_{al} = Kuat izin rencana material perkuatan dengan mempertimbangkan faktor reduksi akibat rangkai (*creep*), pemasangan, dan daya tahan perkuatan geosintetik atau koreksi luas penampang terhadap korosi perkuatan tipe metalik.

Φ = Faktor resistensi untuk keruntuhan tarik

b. Kegagalan Cabut

Faktor keamanan terhadap kegagalan tarik dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\phi L_e \geq \frac{T_{\max}}{F * \alpha \sigma_v C R_c} \quad (2.24)$$

T_{po} = Kapasitas Tarik perkuatan

Kapasitas tarik perkuatan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$F * \alpha \sigma_v C R_c$$

Keterangan:

α = Faktor koreksi tipe perkuatan

(perkuatan baja = 1,0; geogrid = 0,8; geotekstil = 0,8)

R_c = Persentase cakupan perkuatan

σ_v = Tegangan vertikal perkuatan pada kedalaman z dari atas dinding

F^* = Faktor gesekan Tarik.

C = 2, untuk jenis perkuatan tipe strip, grid, dan lembaran

2.6 Stabilitas Lereng

Analisis stabilitas lereng merupakan analisis yang dilakukan pada permukaan tanah yang miring yang bertujuan untuk menentukan faktor keamanan (*safety factor*, F) dari bidang longsor yang potensial. Jika tanah semakin jenuh nilai F semakin turun. Sedangkan jika tanah semakin kering nilai F semakin tinggi. Adapun klasifikasi kestabilan lereng (Hardiyatmo, 2019) dapat dilihat pada Tabel 2.16.

Tabel 2.16 Klasifikasi Kestabilan Lereng

Faktor Aman	Klasifikasi Kestabilan Lereng	Keterangan
$F > 1,5$	Stabil	Hanya gangguan besar dapat membuat kestabilan
$1,25 < F < 1,5$	Kestabilan sedang	Gangguan kestabilan sedang dapat membuat ketidakstabilan
$1 < F < 1,25$	Agak Stabil	Gangguan kestabilan minor dapat mengganggu stabilitas
$F < 1$	Tidak Stabil	Memerlukan perbaikan stabilitas lereng

Faktor keamanan didefinisikan sebagai nilai banding antara gaya yang menahan dan gaya yang menggerakkan, berikut persamaannya:

$$F = \frac{\tau}{\tau_d} \quad (2.25)$$

Dimana:

τ = Tahanan geser maksimum yang dapat dikerahkan oleh tanah

τ_d = Tegangan geser yang timbul akibat gaya berat tanah yang akan longsor

Beberapa metode dapat dilakukan dalam analisis stabilitas salah satunya metode irisan (*methode of slice*) yang digunakan ketika tanah tidak homogen dan aliran rembesan terjadi di dalam tanah tidak menentu. Massa tanah yang longsor dalam metode irisan akan dipecah menjadi irisan vertikal untuk memperlihatkan gaya yang bekerja pada satu irisan. Gaya-gaya tersebut yaitu gaya geser (X_r dan X_i) dan gaya normal efektif (E_r dan E_i) di sepanjang sisi irisan, kemudian resultan gaya geser efektif (T_i) dan resultan gaya normal efektif (N_i) yang bekerja di sepanjang dasar irisan. Terdapat beberapa metode irisan yang dapat dilakukan untuk menganalisis stabilitas timbunan diantaranya metode Fellenius dan metode Bishop.

1. Metode Fellenius

Analisis stabilitas lereng dengan metode fellenius (1936) 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 memperhatikan tekanan air pori adalah:

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

Atau

$$N_i + U_i = W_i \cos \theta_i - u_i a_i$$

Pada metode Fellenius faktor keamanan didefinisikan dengan persamaan

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n c_i + N_i - \tan \phi'}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \sin \phi_i} \quad (2.26)$$

Keterangan:

F = Faktor Keamanan

c = Kohesi Tanah (kN/m^2)

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 irisan

2. Metode Bishop

Salah satu metode bishop yang umum digunakan yaitu metode bishop disederhanakan (*simplified bishop method*). Metode Bishop (1995) ini menganggap bahwa gaya-gaya yang bekerja pada sisi-sisi irisan mempunyai resultan nol pada arah vertikal. Analisis faktor keamanan dari metode Bishop dapat dianalisis dengan menggunakan persamaan berikut.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n c_i + N_i - \tan \phi'}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \sin \phi_i} \quad (2.27)$$

Keterangan:

F = Faktor keamanan

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

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

b_i = Lebar 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 irisan

2.7 Penurunan

Penurunan terjadi akibat lapisan tanah dibebani yang disebabkan oleh berubahnya susunan tanah dan berkurangnya rongga pori di dalam tanah tersebut. Penurunan akibat beban merupakan penurunan total tanah dari penurunan segera dan penurunan konsolidasi. Penurunan segera (*immediate settlement*) merupakan penurunan yang terjadi pada tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus kering atau tidak jenuh. Sedangkan konsolidasi (*consolidation settlement*) merupakan penurunan yang terjadi pada tanah berbutir halus yang terletak di bawah muka air tanah. Penurunan konsolidasi terdiri dari 2 yaitu penurunan konsolidasi primer dan penurunan konsolidasi sekunder. Penurunan total dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S = S_i + S_c + S_s \quad (2.28)$$

Keterangan

S = Penurunan total

S_i = Penurunan segera

S_c = Penurunan konsolidasi primer

S_s = Penurunan konsolidasi sekunder

2.7.1 Penurunan Segera

Penurunan segera terjadi pada tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus kering (tidak jenuh) terjadi segera setelah beban bekerja. Hal ini disebabkan oleh deformasi elastis dari lapisan tanah yang berada tepat di bawah beban yang diterapkan.

$$S_i = \Delta\sigma(\alpha B') \frac{1-\mu_s^2}{E_s} I_s I_f \quad (2.29)$$

Keterangan

S_i = Penurunan seketika

$\Delta\sigma$ = Tekanan dari fondasi

$\alpha = 4$, karena menghitung penurunan di tengah fondasi

$B' = \frac{B}{2}$, untuk menghitung di tengah fondasi

μ_s = Angka poisson rata-rata tanah

I_s = Faktor bentuk fondasi

I_f = Faktor kedalaman fondasi

2.7.2 Penurunan Konsolidasi

Penurunan konsolidasi terjadi pada tanah berbutir halus yang terletak di bawah muka air tanah. Penurunan ini butuh waktu lamannya tergantung pada konsistensi lapisan tanah.

Bila tanah mengalami pembebanan dan berkonsolidasi maka penurunan tanah tersebut berlangsung 3 fase yaitu:

1. Fase awal

Penurunan terjadi segera setelah beban kerja, diakibatkan oleh keluarnya udara dari rongga pori. Proporsi penurunan awal dapat diberikan dalam perubahan angka pori dan dapat ditentukan dari kurva waktu terhadap penurunan dari uji konsolidasi.

2. Fase konsolidasi primer

Penurunan yang dipengaruhi oleh kecepatan aliran air pori yang meninggalkan rongga pori tanah akibat beban. Sangat dipengaruhi sifat tanah. Penurunan konsolidasi primer dapat diestimasi sesuai sejarah pembebanannya:

a. Normally Consolidated (NC)

$$S_c = \frac{C_c H}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad (2.30)$$

b. Overconsolidated (OC) - $(\sigma'_0 + \Delta\sigma' \leq \sigma'_c)$

$$S_c = \frac{C_s H}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad (2.31)$$

c. Overconsolidated (OC) - $(\sigma'_0 + \Delta\sigma' > \sigma'_c)$

$$S_c = \frac{C_s H}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} \right) + \frac{C_c H}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} \right) \quad (2.32)$$

Keterangan

S_c = Penurunan konsolidasi (m)

C_c = Indeks pemampatan

C_s = Indeks pengembangan

H = Tebal lapisan yang berkonsolidasi (m)

σ'_0 = Tegangan vertikal efektif (kN/m^2)

$\Delta\sigma'$ = Distribusi tegangan (kN/m^2)

σ'_c = Tegangan pra-konsolidasi (kN/m^2)

3. Fase Konsolidasi Sekunder

Merupakan proses lanjutan dari konsolidasi primer, proses ini berjalan sangat lambat.

Bila dinyatakan dalam persamaan, penurunan total adalah:

$$S = S_i + S_c + S_s \quad (2.33)$$

Dimana:

S = Penurunan total

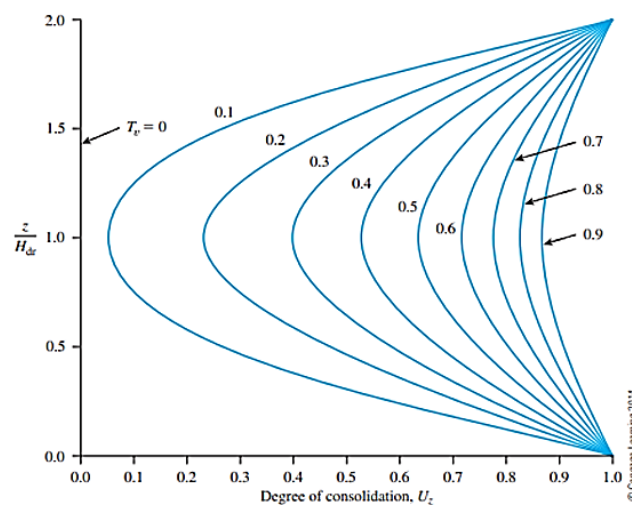
S_i = Penurunan segera

S_c = Penurunan konsolidasi primer

S_s = Penurunan konsolidasi sekunder

2.7.3 Derajat Waktu Konsolidasi

Derajat konsolidasi (U) adalah ukuran sejauh mana konsolidasi telah terjadi dalam tanah. Nilai dari derajat konsolidasi di sajikan dalam persentase antara penurunan yang terjadi pada waktu tertentu dengan total penurunan yang diharapkan. Waktu konsolidasi merupakan durasi yang diperlukan agar suatu tanah mencapai derajat konsolidasi tertentu. Grafik waktu konsolidasi dapat dilihat pada Gambar 2.7 berikut.



Gambar 2.7 Grafik Waktu Konsolidasi

Derajat konsolidasi

$$\frac{U\%}{100} = \frac{(4T_v/\pi)^{0,5}}{[1 - (U\%/100)^{5,6}]^{0,357}} \quad (2.34)$$

Waktu konsolidasi

$$t = \frac{T_v(H_{dr})^2}{C_v} \quad (2.35)$$

2.8 Kriteria Pembebanan

2.8.1 Beban Gempa

Beban gempa merupakan beban dinamik yang mempengaruhi perencanaan struktur salah satunya dinding penahan tanah. Pengaruh beban gempa berdampak terhadap stabilitas, keamanan, dan performa struktur. Aktivitas tersebut dapat memicu terjadinya longsor yang dapat mengakibatkan kerusakan terhadap struktur di sekitarnya.

Berdasarkan SNI 8460:2017 Persyaratan perancangan geoteknik, periode ulang (T) untuk struktur dinding penahan tanah, abutmen dan jembatan yaitu 1000 tahun dengan umur rencana 75 tahun dan probabilitas terlampaui 7%. Kriteria perancangan gempa tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.17.

Tabel 2.17 Kriteria Faktor Keamanan Perancangan Gempa Berdasarkan Peruntukannya

No	Peruntukan	Umur Rencana (Tahun)	Probabilitas Terlampaui (%)	Periode Ulang (Tahun)	Faktor Keamanan
1	Gedung dan Non gedung	50	2	2500	
2	Jembatan	75	7	1000	

No	Peruntukan	Umur Rencana (Tahun)	Probabilitas Terlampaui (%)	Periode Ulang (Tahun)	Faktor Keamanan
3	Dinding Penahan Abutmen Jembatan	75	7	1000	<p>FK >1,5 (terhadap geser saat mengalami beban statik)</p> <p>FK>2 (terhadap guling saat mengalami beban statik)</p> <p>FK>1,1 (terhadap beban pseudostatik)</p>
4	Timbunan oprit	100			FK>1,1
5	Bendungan	100	1	<p>10000, <i>Safety evaluation earthquake</i></p> <p>145 <i>Operating Basis Earthquake</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak terjadi aliran air tidak terkendali • Deformasi tidak melebihi 0,5 dari tinggi jagaan • Deformasi pada filter tidak boleh

No	Peruntukan	Umur Rencana (Tahun)	Probabilitas Terlampaui (%)	Periode Ulang (Tahun)	Faktor Keamanan
					melebihi 0,5 tebal filter • <i>Spillway</i> tetap berfungsi setelah terjadi gempa rencana kerusakan minor setelah terjadi gempa rencana
6	Bangunan pelengkap	50	2	2500	
7	Terowongan	100	10	1000	

Nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) pada lokasi penelitian perlu diketahui untuk memperhitungkan pengaruh beban gempa. Nilai tersebut diperoleh melalui penentuan klasifikasi situs dengan persamaan sebagai berikut:

$$\bar{N} = \frac{\sum d_i}{\sum d_i / N_i} \quad (2.36)$$

Dimana:

\bar{N} = hasil tes penetrasi standar rata-rata

D_i = tebal lapisan tanah pertinjauan (m)

N_i = nilai tes penetrasi N-SPT per lapisan tanah

Penentuan klasifikasi tanah berdasarkan kelas situsnya dapat dikategorikan dengan merujuk pada Tabel 2.18 (SNI 1726, 2019)

Tabel 2.18 Klasifikasi Situs

Kelas Situs	\bar{v} (m/detik)	\bar{N} atau \bar{N}_{ch}	\bar{s}_u (kPa)
<i>SA</i> (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
<i>SB</i> (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
<i>SC</i> (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
<i>SD</i> (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
<i>SE</i> (tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: <ol style="list-style-type: none"> 2. Indeks plastisitas, $PI > 20$ 3. Kadar air, $w \geq 40\%$, 4. Kuat geser $\bar{s}_u < 25$ kPa 		
<i>SF</i> (tanah khusus yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut:		

Kelas Situs	\bar{v} (m/detik)	\bar{N} atau \bar{N}_{ch}	\bar{s}_u (kPa)
analisis respons spesifik-situs yang mengikuti (0)	<ul style="list-style-type: none"> - Rawan dan berpeotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi. lempung sangat sensitive, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) - Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$) <p>Lapisan lempung lunak/setengah pakai teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{s}_u < 50$ kPa</p>		

2.8.2 Beban Lalu Lintas dan Perkerasan

Beban lalu lintas merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi umur layan jalan. Beban yang bekerja terus menerus dari kendaraan ringan dan berat dapat menyebabkan kerusakan terhadap infrastruktur jalan. Berdasarkan (SNI 8460, 2017) terdapat beban lalu lintas untuk analisis stabilitas yang disesuaikan dengan kelas jalan, kriteria tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.19.

Tabel 2.19 Beban Lalu Lintas untuk Analisis Stabilitas dan Beban di Luar Jalan

No	Kelas Jalan	Beban Lalu Lintas (kPa)	Beban di Luar Jalan (kPa)
1	I	15	10
2	II	12	10
3	III	12	10

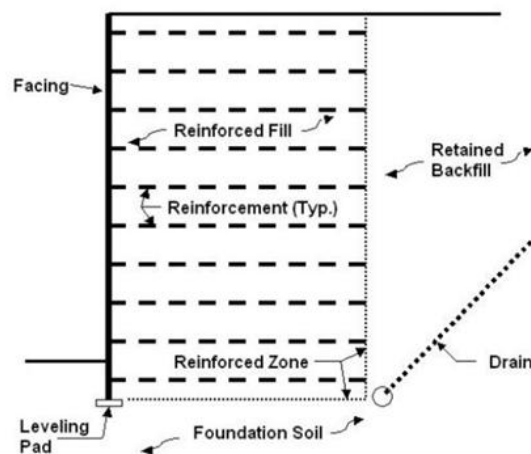
Berat jenis perkerasan jalan (Agregat, ACWC, dan ACBC) (DitJen Bina Konstruksi, 2023) digunakan untuk analisis perkerasan jalan yang mengalikan tebal rencana perkerasan dengan berat jenis perkerasan. Nilai berat isi jenis perkerasan tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.20.

Tabel 2.20 Berat Isi Perkerasan Jalan

No	Nama Bahan	Berat Isi (kN/m ³)
1	ACWC	22,11
2	ACBC	22,66
3	ACBS	22,70
4	Agregat	17,6

2.9 Mechanically Stabilized Earth (MSE) Wall

Mechanically Stabilized Earth (MSE) Wall dibangun dengan meletakkan elemen kekuatan pada tiap lapisan, MSE *Wall* dipadatkan di belakangnya dengan tanah timbunan yang dipilih (Meutia Corphyllia Frianvonsa Ratag Agnes Mandagi & I Legrans, 2018). Dalam SNI 8460:2017, dijelaskan bahwa MSE *Wall* terdiri atas dinding muka/penutup muka, perkuatan baja atau geosintetik yang dikaitkan pada dinding muka dan dipasang secara berlapis di dalam timbunan tanah berbutir yang mudah mengalirkan air. Kombinasi kekuatan dan timbunan tanah berbutir menghasilkan struktur yang secara internal stabil. Potongan melintang MSE *Wall* dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Potongan Melintang Umum MSE Wall

Tanah timbunan yang disarankan untuk MSE Wall adalah tanah granular karena tanah granular memiliki kemampuan menyalurkan tegangan, ketahanan, dan drainase yang baik dibandingkan tanah lempung. Berikut merupakan tabel ketentuan material tanah granular pada MSE Wall (Meutia Corphyllia Frianvonsa Ratag Agnes Mandagi & I Legrans, 2018). Ketentuan material granular pada MSE Wall dapat dilihat pada Tabel 2.21.

Tabel 2.21 Ketentuan Material Granular pada MSE Wall

Gradasi (AASHTO T-27)	Ukuran Saringan	Persen Lolos
	4 in (102 mm)	100
	No 4 (4,76 mm)	100 - 20
	No 200 (0,075 mm)	0 - 50
Indeks Plastisitas (AASHTO T-90)	PI ≤ 6	
Notes: Ukuran maksimum partikel harus disesuaikan dengan penggunaan material perkuatan yang digunakan. Untuk penggunaan material geosintetik, ukuran dapat dikurang menjadi ¾ in (19 mm)		

2.9.1 Tipe Sistem

Sistem dinding MSE *Wall* dapat dideskripsikan berdasarkan konfigurasi geometri perkuatan, mekanisme distribusi tekanan, jenis material perkuatan, tingkat kelenturan material perkuatan, serta tipe panel muka dan sambungan. Rangkuman sistem dinding MSE *Wall* tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.22 (Fhwa, 2009)

Tabel 2.22 Tipe Sistem dinding MSE *Wall*

Sistem	Tipe	Keterangan
Geometri perkuatan	<i>Linear undirectional</i>	Strip, termasuk strip baja halus atau berusuk, atau strip geosintetik yang dilapisi di atas serat pembawa beban.
	<i>Composite undirectional</i>	Kisi (grid) atau alas batang yang ditandai dengan jarak kisi lebih dari 6 inci (150 mm).
	<i>Planar bi-directional</i>	Lembaran geosintetik yang menerus, <i>wire mesh</i> las, dan <i>wire mesh</i> anyaman. <i>Mesh</i> ditandai dengan elemen kurang dari 6 inci (150 mm)
Material Perkuatan	Perkuatan logam	Biasanya baja ringan. Baja tersebut biasanya di galvanisasi
	Perkuatan non-logam	Umumnya bahan <i>Polymeric</i> yang terdiri atas <i>Polyster</i> atau <i>Polyethylene</i>
Eksentisibilitas perkuatan	<i>Inextensible</i>	Deformasi tulangan pada saat keruntuhan jauh lebih kecil dibandingkan dengan deformabilitas tanah. Perkuatan strip baja

Sistem	Tipe	Keterangan
		dan <i>bar mat</i> termasuk perkuatan <i>inextensible</i>
	<i>Extensible</i>	Deformasi tulangan pada saat keruntuhan sebanding dengan atau bahkan lebih besar dari deformabilitas tanah. Geogrid, geotekstil, dan <i>woven steel wire mesh</i> adalah contoh perkuatan <i>extensible</i> .

2.9.2 Penutup Muka

Sistem penutup muka (*facing system*) berfungsi untuk memberikan perlindungan terhadap kelongsoran timbunan dan erosi, serta meningkatkan estetika dinding. Adapun tipe utama penutup muka adalah sebagai berikut:

1. Panel beton pracetak segmental
2. *Dry cast modular block wall* (MBW)
3. *Welded wire mesh* (WWM)
4. Dinding Gabion
5. Penutup muka dengan geosintetik
6. Penutup muka pos-konstruksi

2.9.3 Sistem Perkuatan

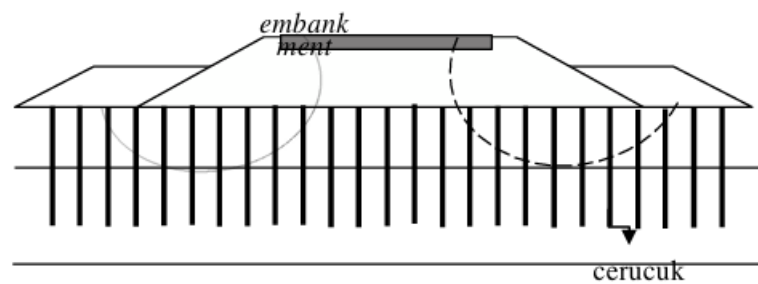
Sistem perkuatan dipengaruhi oleh jenis sistem penutup dinding yang diterapkan. Ringkasan sistem perkuatan untuk setiap jenis penutup dinding disajikan dalam Tabel 2.23 (Fhwa, 2009).

Tabel 2.23 Sistem Perkuatan dinding MSE *Wall* beserta tipe dinding penutupnya

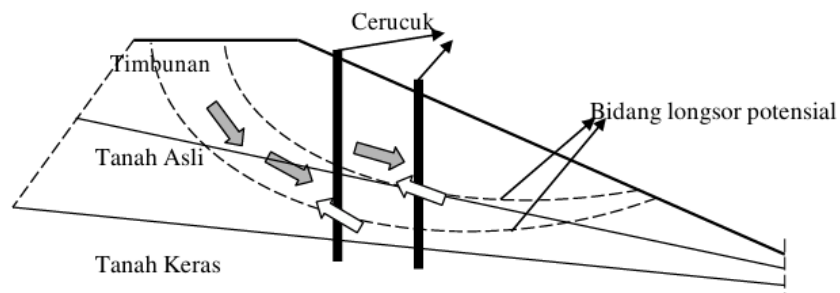
Tipe Perkuatan	Tipe Dinding Penutup
<i>Steel Strips</i>	Panel beton pracetak segmental
<i>Steel Grids</i>	Panel beton pracetak segmental
<i>High density polyethylene (HDPE) geogrid</i>	MBW, Panel beton pracetak segmental
<i>PVC coated polyester (PET) geogrid</i>	MBW
<i>Geotekstil</i>	-
<i>Double twisted steel mesh</i>	Gabion
<i>Geosynthetic strip</i>	Panel Segmental

2.10 Cerucuk Beton (*Minipile*)

Beton bercerucuk merupakan penggunaan tiang cerucuk berupa grup (Kelompok) yang dimaksudkan untuk memikul beban melalui lekatan kulit (permukaan selimut) cerucuk atau dikenal dengan tiang friksi yang dihitung menggunakan rumus-rumus tiang pancang maupun sebagai metode untuk memadatkan tanah yaitu dengan memasukkan sejumlah volume cerucuk tersebut ke dalam tanah (Yusuf, 2011). Berikut merupakan gambar penggunaan cerucuk pada embankment jalan sebagai perkuatan.



Gambar 2.9 Aplikasi Penggunaan Cerucuk untuk Embankment Jalan



Gambar 2.10 Aplikasi Penggunaan Cerucuk sebagai Perkuatan Lereng
Embankment Jalan Cerucuk

Untuk Menghitung kebutuhan cerucuk per-meter dalam teori Mochtar (2000) ditentukan terlebih dahulu kekuatan 1 (satu) cerucuk untuk menahan gaya horizontal. Berikut persamaan untuk menghitung kebutuhan cerucuk:

$$P_{\max} \text{ 1 cerucuk} = \frac{M_{p\max} \text{ 1 cerucuk}}{F_M \times T} \quad (2.37)$$

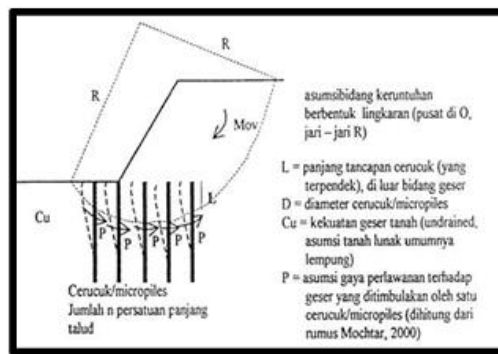
Dimana:

$M_{p\max}$ = Momen Tarik max yang bekerja pada cerucuk akibat beban P, kg-cm

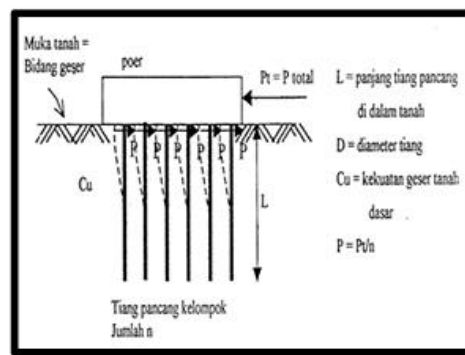
F_M = koefisien momen akibat gaya lateral P

P_{\max} = Gaya horizontal maksimum yang diterima cerucuk, kg

T = Faktor kekakuan relatif, cm



Gambar 2.11 Asumsi kedudukan cerucuk sebagai penahan terhadap keruntuhan geser di lapangan



Gambar 2.12 Asumsi tiang pancang kelompok menahan gaya lateral yang digunakan sebagai dasar mencari tahanan geser cerucuk.

2.11 Geoforce Segmental Retaining Wall (GSRW)

Geoforce Segmental Retaining Wall (GSRW) adalah jenis struktur dinding penahan tanah yang dibangun dari lapisan-lapisan tanah timbunan yang telah dipadatkan, dilengkapi dengan elemen *facing* berbahan beton pracetak berpresisi tinggi, diperkuat menggunakan sabuk yang dikenal dengan GI-Strip. Keunggulan GSRW dibandingkan produk segmental lain terletak pada kestabilan struktur yang telah terbukti melalui pengujian, harganya yang lebih ekonomis dibandingkan sistem serupa, serta kemudahan dalam proses instalasi di lapangan yang berdampak langsung pada efisiensi waktu pelaksanaan. Selain itu, sistem ini juga menawarkan nilai estetika yang lebih tinggi, menjadikannya pilihan ideal untuk proyek di area perkotaan seperti pembangunan *flyover* yang tidak hanya membutuhkan kekuatan

struktur tetapi juga mempertimbangkan aspek visual kota. Gambar 2.13 (Geoforce, 2023) merupakan contoh konstruksi GSRW.



Gambar 2.13 Contoh Konstruksi GSRW

Sistem GSRW menggunakan sabuk friksi (GI-Strip) sebagai elemen perkuatan, yang dibuat dari benang PET berkekuatan tinggi (*High Tenacity PET Yarn*). Material ini dirancang secara khusus untuk menghasilkan sabuk dengan daya tarik dan koefisien gesekan yang tinggi, sehingga memberikan kekuatan dan kestabilan pada struktur GSRW. GI-strip tersedia dalam beberapa varian kekuatan tarik, yaitu 30 kN, 50 kN, 80 kN, dan 100kN.

2.12 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga adalah metode numerik untuk mendapatkan Solusi permasalahan diferensial dan merupakan salah satu metode numerik paling versatile untuk memecahkan problem dalam *domain continuum*. Proses inti MEH adalah membagi masalah yang kompleks menjadi bagian-bagian kecil atau elemen-elemen yang dapat dengan mudah digunakan untuk Solusi yang lebih sederhana. Solusi dari setiap elemen jika digabungkan akan menjadi Solusi masalah secara keseluruhan (Isworo dkk., 2018). Penelitian (Komala dkk., 2024) terkait sistem *cofferdam* menggunakan pendekatan dengan bantuan perangkat lunak berbasis elemen hingga dalam mengevaluasi stabilitas untuk mengetahui sistem perkuatan yang efektif. Pendekatan tersebut diadaptasi dalam penelitian ini untuk mengevaluasi deformasi dan stabilitas MSE Wall pada tanah lunak.